



Application des cartes combinatoires à la modélisation géométrique et sémantique des bâtiments

Abdoulaye Abou Diakite

► To cite this version:

Abdoulaye Abou Diakite. Application des cartes combinatoires à la modélisation géométrique et sémantique des bâtiments. Modélisation et simulation. Université Claude Bernard - Lyon I, 2015. Français. NNT : 2015LYO10281 . tel-01314440

HAL Id: tel-01314440

<https://theses.hal.science/tel-01314440>

Submitted on 11 May 2016

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

THÈSE
pour obtenir le grade de
DOCTEUR EN INFORMATIQUE de L'UNIVERSITÉ DE LYON

École Doctorale : **Informatique et Mathématiques**
Domaine de Recherche : **Informatique Graphique**

Présentée et soutenue publiquement par
ABDOULAYE ABOU DIAKITÉ
le 11 DÉCEMBRE 2015

**APPLICATION DES CARTES COMBINATOIRES À LA
MODÉLISATION GÉOMÉTRIQUE ET SÉMANTIQUE
DES BÂTIMENTS**

Sous la direction de
Guillaume Damiand et Dirk Van-Maercke

Composition du jury

M. Florent Lafarge, Chercheur HDR à INRIA	Rapporteur
M. Christophe Nicolle, Professeur à l'Université de Bourgogne, LE2I	Rapporteur
M. Gérard Hégron, Directeur de Recherche, IFSTTAR	Examineur
M. Nicolas Paparoditis, Directeur de Recherche, IGN	Examineur
M. Florent Dupont, Professeur à l'Université de Lyon 1, LIRIS	Examineur
M. Guillaume Damiand, Chercheur HDR au CNRS, LIRIS	Directeur de thèse
M. Dirk Van-Maercke, Ingénieur CSTB, Grenoble	Co-Directeur de thèse



À la mémoire de mon père, Dr. Abou Siddick Diakité...

RÉSUMÉ

Les modèles 3D de bâtiment sont largement utilisés dans l'industrie de la construction et sont nécessités par plusieurs applications telles que la représentation architecturale et les processus de simulation. Malheureusement, ces modèles manquent souvent d'informations d'une importance majeure pour permettre d'effectuer des opérations d'analyse et de calcul. Les modèles originaux sont alors souvent reconstruits par les différents acteurs qui les utilisent afin de les rendre plus adaptés à leur besoins.

Dans le but de pallier ce problème, nous introduisons une approche permettant d'enrichir un modèle 3D de bâtiment et le rendre beaucoup plus interopérable. À partir de l'information géométrique seulement, nous rajoutons au modèle des informations topologiques et sémantiques. Une subdivision cellulaire de l'espace occupé par le bâtiment est d'abord effectuée en se basant sur sa géométrie, puis les relations topologiques entre les cellules sont reconstruites et explicitement définies. Des étiquettes sémantiques sont ensuite attribuées aux composants identifiés du bâtiment à l'aide de la topologie reconstruite et des règles heuristiques prédéfinies.

Une structure de données topologique appelée carte combinatoire 3D (3-carte) est utilisée comme une base solide pour la mise au point des opération de reconstruction et le traitement des informations reconstruites. À partir du modèle enrichi, nous montrons comment extraire des données pour des applications dédiées, par exemple la simulation acoustique et lancer de rayon pour la navigation intérieure. Notre méthode se présente comme un pont entre les approches de modélisation et les applications d'analyse du bâtiment qui utilisent ces modèles. Il est entièrement automatique et présente des résultats intéressants sur plusieurs types de modèles.

MOTS CLÉS : Cartes Combinatoires, Topologie, Sémantique, BIM, SIG, Simulation sur Bâtiment.

APPLICATION OF THE COMBINATORIAL MAPS TO GEOMETRIC AND SEMANTIC MODELLING OF BUILDINGS

ABSTRACT

3D building models are widely used in the civil engineering industry. While the models are needed by several applications, such as architectural representations and simulation processes, they often lack of information that are of major importance for the consistency of the calculations. The original models are then often rebuilt in the way that fits better to the intended applications.

To overcome this drawback, we introduce a framework allowing to enrich a 3D model of a building presenting just a geometry, in a way more interoperable model, by adding to it topological and semantic information. A cellular subdivision of the building space is first performed relying on its geometry, then the topological relationships between the cells are explicitly defined. Semantic labels are then attributed to the identified components based on the topology and defined heuristic rules.

A 3D combinatorial map data structure (3-map) is used to handle the reconstructed information. From the enriched model we show how to extract applications-driven information allowing to perform acoustic simulation and indoor ray tracing navigation. The approach stands as a bridge between the modeling approaches and the applications in building analysis using the model. It is fully automatic and present interesting results on several types of building models.

KEYWORDS :

Combinatorial Maps, Topology, Semantic, BIM, GIS, Building Simulation.

Abdoulaye Abou Diakité - Laboratoire d'InfoRmatique en Image et Systèmes d'information (LIRIS) - CNRS UMR 5205 Université Claude Bernard, Bâtiment Nautibus (710), 43 Boulevard du 11 Novembre 1918, 69622 Villeurbanne Cedex.

ACKNOWLEDGMENTS

Ce travail, bien qu'il soit à mon nom, n'aurait sans doute pas été possible sans l'aide et le soutien de plusieurs individus. À commencer par ma chère mère, Ndèye Diouga, mon éternel supportrice et conseillère en toute circonstance. Elle est à la tête d'une liste de membres de famille et d'amis proches que je ne m'aventurerai point à citer, au risque d'en oublier certains. Ce sont leurs prières et leur présence dans ma vie qui ont fait de moi ce que suis. Merci à vous.

Par ailleurs, comment pourrais-je ne pas remercier tous mes collègues du LIRIS grâce à qui j'ai pu parachever ce travail dans une ambiance parfaitement adéquate (... bien entendu, si l'on fait fi des innombrables pauses, des assauts imprévisibles de Nerf, des blagues à deux balles du vendredi, des actes de vandalismes à répétition sur mon bureau et j'en passe... :p). Parmi eux je me dois de citer Guillaume, mon encadrant qui, au delà du contrat qui nous lie, a su motiver et maintenir ma passion de chercheur et rendre notre collaboration aisée et productive. Ensuite, j'éviterai une fois de plus de citer plus de noms, mais merci à vous les membres de ce cher bureau du LIRIS¹ que je ne suis pas prêt d'oublier, de même que tous les membres de la pause café de 16h30 qui s'est imposée avec le temps, embarquant d'ailleurs certains permanents du labo qui se reconnaîtront.

Un grand merci à tous. Ce travail est notre réussite ;)

TABLE DES MATIÈRES

1	INTRODUCTION ET CONTEXTE	1
2	ÉTUDE BIBLIOGRAPHIQUE	5
2.1	Les Différents Types de Données 3D de Bâtiment	7
2.1.1	Modèles bâtiments de type BIM	7
2.1.2	Modèles bâtiments de type SIG	8
2.2	Traitement des Bâtiments Sans Supports Numériques	10
2.2.1	Travaux axés sur l'intérieur des bâtiments	11
2.2.2	Travaux axés sur l'extérieur des bâtiments	15
2.2.3	Discussion	22
2.3	Traitement des Bâtiments avec Supports Numériques	24
2.3.1	Bâtiments possédant des supports de type esquisses ou plans 2D	25
2.3.2	Bâtiments possédant des modèles de type CAAO	27
2.3.3	Bâtiments possédant des modèles de type BIM	30
2.3.4	Discussion	31
2.4	Les Structures de Données Pour Modéliser des Bâtiments	33
2.4.1	Notions de bases sur les structures de données topologiques .	33
2.4.2	Structures de données topologiques utilisées dans la littérature	35
2.4.3	Discussion	37
2.5	Les cartes combinatoires	38
2.5.1	Définitions de base	38
2.5.2	Opération de i-couture	41
2.5.3	Opération de i-suppression	42
2.5.4	Opération de i-insertion	45
2.5.5	Attributs et LCC	47
2.5.6	Pourquoi utiliser des 3-cartes dans nos travaux?	47
3	RECONSTRUCTION TOPOLOGIQUE DE BÂTIMENTS 3D	49
3.1	Vision Globale de l'Algorithme de Reconstruction	52
3.1.1	Préconditions sur les Données de Départ	52
3.1.2	Données d'Entrée et de Sortie Pour Chaque Étape	53
3.2	Chargement de la géométrie dans l'EBM-LCC	55
3.3	Prétraitements	56
3.3.1	Fusion des 0-cellules proches	57

3.3.2	Suppression des 2-cellules dégénérées	58
3.3.3	Correction des 2-cellules non simples	61
3.3.4	Suppression des clones	65
3.3.5	Fusion des 2-cellules coplanaires	65
3.4	Methode de Reconstruction Classique	69
3.4.1	Reconstruction des liens entre les 2-cellules	69
3.4.2	Reconstitution des liens entre les 3-cellules	76
3.5	Methode de Reconstruction Avancée	89
3.5.1	Faces manquantes ou en trop et problèmes d'orientation . . .	89
3.5.2	Principe Général du Smart Spatial Subdivision Reconstruc- tion (3SR)	92
3.5.3	Reconstruction des Liens entre les 2-cellules	94
3.5.4	Reconstruction des Liens entre les 3-cellules	97
3.6	Problèmes de précision	99
4	IDENTIFICATION AUTOMATIQUE DE L'INFORMATION SÉMANTIQUE 103	
4.1	Étiquetage Sémantique Automatique de modèles BIM	106
4.1.1	Formalisme topologique pour les BIMs	106
4.1.2	Identification des composants BIMs	107
4.2	Étiquetage Sémantique Automatique de modèles SIG	120
4.2.1	Formalisme topologique pour les SIG	120
4.2.2	Identification des composants SIG	122
5	EXPÉRIMENTATIONS ET APPLICATIONS	129
5.1	Prétraitements	131
5.1.1	Fusion des 0-cellules Proches	131
5.1.2	Suppression des 2-cellules dégénérées	132
5.1.3	Suppression des Clones	134
5.1.4	Fusion des 2-cellules coplanaires	134
5.2	Reconstruction Topologique	136
5.2.1	Résultats de la Reconstruction des Liens β_2	137
5.2.2	Résultats de la Reconstruction des Liens β_3	139
5.2.3	Problèmes sur les données BIM	142
5.2.4	Problèmes sur les données SIG	146
5.2.5	Impact du Choix des Marges d'Erreur ϵ	148
5.3	Étiquetage Sémantique	150
5.4	Extraction d'Information pour de la Simulation Acoustique	155
5.4.1	Modèle des Plaques Minces (MPM) pour l'Acoustique	156
5.4.2	Informations Requises pour AcouBAT	156
5.4.3	De l'EBM-LCC au MPM	157

5.5	Extraction d'Information pour du Lancer de Rayons	161
5.5.1	Partition Contrainte Convexe de l'Espace (CCSP) pour le lan- cer de rayons	162
5.5.2	Informations requises pour le lancer de rayons	163
5.5.3	De l'EBM-LCC au CCSP	164
5.5.4	Performances du lancer de rayons	165
5.6	Extraction Automatique de Niveaux de Detail	167
5.6.1	Extraction de LoD3 à partir de modèles BIM	168
5.6.2	Extraction de LoD2 et LoD1 à partir de Modèles BIM	169
6	CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES	173
	BIBLIOGRAPHIE	177

INTRODUCTION ET CONTEXTE

*Une quête commence toujours par la chance du débutant.
Et s'achève toujours par l'épreuve du conquérant.*

— Paulo Coelho

De nos jours, les modèles 3D occupent un rôle central dans les projets de construction de bâtiments. Créés dès le tout début du processus de construction, ils sont développés, améliorés, modifiés et servent de référence, jusqu'à la fin des travaux. Dans l'idéal, l'objectif est de conserver et de mettre à jour le modèle d'une construction durant tout le cycle de vie de l'édifice. Pendant ce processus complexe, de nombreux acteurs aux expertises diverses vont travailler sur un même modèle à des fins différentes. Tous ces acteurs partagent les mêmes objectifs, à savoir : rendre le bâtiment plus résistant et durable, le moins polluant possible et avec le maximum de confort et de sécurité pour les personnes qui auront à y rester. Cependant ils sont confrontés au problème bien connu de l'interopérabilité. En effet, n'ayant pas les mêmes besoins en matière d'information, beaucoup de domaines d'expertise ne se reconnaissent pas dans les données de base du modèle et finissent par construire leurs propres versions du modèle, plus adaptées à leurs opérations.

Ce problème rend le processus global de la construction plus fastidieux qu'il ne l'est déjà et représente une perte de temps considérable passée à modéliser le bâtiment à plusieurs reprises de différentes manières. Il augmente également les chances d'apporter des incohérences de description et des conflits de données dans le modèle au fur et à mesure que ce dernier passe d'un domaine à l'autre. Durant cette dernière décennie, des standards appelés *Building Information Models* (BIM), capable de stocker une grande portée d'informations dans un seul modèle, ont été introduits pour faire face à ces inconvénients. Le plus connu et utilisé parmi ces standards BIM est le *Industry Foundation Classes* (IFC) [33]. Développé par le consortium *Building Smart* (ex *International Alliance for Interoperability*) [158], il s'agit d'un modèle capable de stocker une large panoplie de données et qui offre de nombreuses classes permettant de décrire toutes sortes de composants d'un bâtiment. Par ailleurs, dans le domaine des *Systèmes d'Information Géographique* (SIG) qui s'intéresse à la modélisation de bâtiments à l'échelle d'une ville entière, voire plus, le problème de l'interopérabilité n'est pas en reste. De ce fait des standards visant à limiter l'impact de ce problème ont été également introduits. Le plus utilisé de ces standards en SIG est le *City Geography*

Markup Language (CityGML) [114], développé par l'*Open Geospatial Consortium* (OGC). Le CityGML permet de décrire tous les éléments d'un bâtiment et de son environnement, mais reste plus axé sur l'environnement extérieur.

Malheureusement, en dépit des efforts apportés par les divers acteurs du monde de la construction pour converger vers les standards, le manque d'informations dans les modèles 3D reste encore un problème commun. Du fait que les formats des modèles BIM et SIG sont assez récents, seuls les projets de constructions très récents en bénéficient et sont en mesure de fournir des versions correctes de ce genre de modèles standardisés. En revanche, tous les bâtiments antérieurs à ces standards sont disponibles uniquement sous forme de modèles CAAO¹ ou même sous forme d'esquisses et de plans 2D. Pour les plus anciens, aucun de ces modèles n'existe, de ce fait des méthodes de balayage laser et de reconstruction par vision par ordinateur sont utilisées pour tenter de récupérer des modèles numériques du niveau d'un CAAO. Ces types de modèles sont principalement axés sur la géométrie, avec le stockage de listes de primitives géométriques pour décrire tous les composants du bâtiment représenté. Cela rend leur usage limité à des applications à objectif principalement visuel, car ils ne possèdent pas assez d'informations pour effectuer des opérations d'analyses comme de la simulation numérique.

Les applications d'analyse ont en commun un besoin crucial de deux types d'informations supplémentaires en dehors de la géométrie, à savoir la topologie et la sémantique. La topologie, pour un modèle 3D d'un bâtiment donné, correspond à l'ensemble des relations spatiales qui lient tous les éléments de la construction. La sémantique, quant à elle, permet d'identifier la nature et les caractéristiques de chacun des composants du modèle. Bien que permettant de décrire les informations géométriques et topologiques, les standards IFC et CityGML restent principalement orientés sur l'information sémantique. Cependant l'interopérabilité des données entre les différents domaines d'expertises techniques de la construction n'est pas envisageable sans la combinaison convenable de ces trois catégories d'informations. Ainsi, avec un modèle rassemblant la géométrie, la topologie et la sémantique, nous avons assez d'informations pour procéder à presque toutes les applications d'analyse d'un bâtiment à partir de son modèle 3D.

C'est dans ce cadre que nous présentons dans ce manuscrit nos travaux dont le but est d'enrichir les modèles initialement constitués d'informations géométriques, avec des informations topologiques et sémantiques. Étant donné que la géométrie est la seule information que nous sommes sûr de trouver dans un modèle 3D de bâtiment, notre objectif est, dans un premier temps, d'exploiter cette géométrie afin de reconstruire la topologie qu'elle contient de manière implicite.

1. Conception Architecturale Assistée par Ordinateur

Nous obtenons alors des modèles fournis en géométrie et en topologie, avec toutes les relations spatiales qui lient leurs composants explicitement décrites. Ensuite nous procédons à l'enrichissement sémantique de ces composants en exploitant leurs propriétés géométriques ainsi que leurs relations topologiques pour l'établissement de règles heuristiques. Nous obtenons alors des modèles riches de leur géométrie, topologie et sémantique, sur lesquels des opérations de plus haut niveau peuvent être appliquées, comme par exemple des applications d'analyse ou d'extraction de modèles dédiés.

Du fait qu'elle constitue une information de haute importance et qu'elle est pourtant l'information la moins considérée par les standards, nous mettons la topologie au coeur de notre approche. Ainsi, notre processus d'enrichissement des modèles géométriques repose principalement sur la reconstruction topologique, qui constitue sa phase clé. Pour mener à bien nos travaux, nous nous aidons des cartes combinatoires, une structure de données topologique générique idéalement adaptée à la représentation de bâtiment. Grâce aux cartes combinatoires et au formalisme qu'elles offrent, il nous est possible de garantir d'une part la validité topologique de nos modèles, d'autre part de combiner toutes les informations dans une même structures. Elles permettent également de définir toutes les opérations nécessaires à la mise en oeuvre de l'enrichissement des modèles mais aussi l'extraction des informations ciblées pour des applications données. Nous avons testé notre approche sur des données de type BIM et SIG, prouvant ainsi la généricité de l'approche face aux différents type de modèles.

Les contributions présentées dans ce manuscrit sont les suivantes :

- la mise au point d'une méthode générique de reconstruction de l'information topologique d'un modèle 3D de bâtiment (BIM ou SIG) uniquement à partir de sa géométrie ;
- la définition d'un ensemble d'opérations permettant de garantir la validité topologique des relations spatiales reconstruites ;
- la mise en place d'un système flexible de création de règles heuristiques basées sur la géométrie et la topologie des modèles ;
- la définition d'un ensemble de règles heuristiques permettant l'indentification sémantique des principaux composants structurels d'un bâtiment ;
- l'extraction de données dédiées à la simulation acoustique ;
- l'extraction de données dédiées à la simulation d'éclairage ;
- et l'extraction de différents niveaux de détails à partir d'un modèle 3D détaillé.

L'organisation de ce document est établie de la manière suivante. Dans le chapitre 2, nous présentons une étude bibliographique qui couvre l'ensemble des études visant à la création et à l'enrichissement de modèles de bâtiment 3D, que ce soit dans le domaine du BIM ou du SIG. Nous y présentons également

une description détaillées des propriétés et définitions des cartes combinatoires, qui constituent le cœur de nos méthodes, et nous la comparons aux autres modèles existant pour justifier notre choix. Dans le chapitre 3, nous exposons de manière détaillé l'ensemble du processus de reconstruction des liens topologiques des composants des modèles, à partir de l'information géométrique qu'ils contiennent. Nous y expliquons notamment l'ensemble des opérations qui nous permettent de mener à bien la reconstruction. Ensuite nous montrons dans le chapitre 4 comment nous procédons à l'étiquetage sémantique des composants reconstruits des modèles. Nous proposons dans ce chapitre un ensemble de règles heuristiques permettant de deviner la nature sémantique des éléments structurels de nos modèles BIM et SIG. Dans le chapitre 5, nous détaillons l'ensemble des résultats de nos expérimentations, donnant ainsi une idée de l'application de nos méthodes sur les types de données traitées. Il s'en suit les explications des processus d'extraction de données pour les applications que sont la simulation acoustique, le lancer de rayons et la simplification des modèles. Enfin nous terminons par le chapitre 6 dans lequel nous donnons le bilan global de nos travaux et discutons de l'ensemble des perspectives qui s'ouvrent à sa suite.

ÉTUDE BIBLIOGRAPHIQUE

*Dans la recherche commune des arguments,
celui qui est vaincu a gagné davantage,
à proportion de ce qu'il vient d'apprendre.*

— Épicure

Sommaire

2.1	Les Différents Types de Données 3D de Bâtiment	7
2.1.1	Modèles bâtiments de type BIM	7
2.1.2	Modèles bâtiments de type SIG	8
2.2	Traitement des Bâtiments Sans Supports Numériques	10
2.2.1	Travaux axés sur l'intérieur des bâtiments	11
2.2.2	Travaux axés sur l'extérieur des bâtiments	15
2.2.3	Discussion	22
2.3	Traitement des Bâtiments avec Supports Numériques	24
2.3.1	Bâtiments possédant des supports de type esquisses ou plans 2D	25
2.3.2	Bâtiments possédant des modèles de type CAAO	27
2.3.3	Bâtiments possédant des modèles de type BIM	30
2.3.4	Discussion	31
2.4	Les Structures de Données Pour Modéliser des Bâtiments	33
2.4.1	Notions de bases sur les structures de données topologiques	33
2.4.2	Structures de données topologiques utilisées dans la littérature	35
2.4.3	Discussion	37
2.5	Les cartes combinatoires	38
2.5.1	Définitions de base	38
2.5.2	Opération de i-couture	41
2.5.3	Opération de i-suppression	42
2.5.4	Opération de i-insertion	45
2.5.5	Attributs et LCC	47
2.5.6	Pourquoi utiliser des 3-cartes dans nos travaux ?	47

La modélisation 3D de bâtiments est un sujet de recherche qui a connu un essor fulgurant dès les années 60, du fait de l'avènement des outils d'aide à la conception par ordinateur (CAO) [135, 128, 101, 81]. Dès le départ, il est tout de suite apparu une large panoplie d'applications pouvant considérablement tirer profit d'une telle technologie. Nous pouvons citer par exemple l'élaboration de maquettes virtuelles, la planification et la gestion des constructions, la rénovation de bâtiments, la préservation de patrimoines culturels, les cartes de navigation, sans oublier les différentes applications liées à la simulation numérique [100]. De plus, les avancées des méthodes de production des modèles de bâtiments et de villes ont largement contribué à l'accroissement du potentiel de ce type de données. La récente prise de conscience de ce fort potentiel par les grandes entreprises de construction et les communes a ainsi été l'élément déclencheur d'une nouvelle vague de recherche sur le sujet afin de faire face à de nouveaux défis.

Deux grands domaines de recherche se démarquent dans les investigations relatives à la modélisation du bâtiment : les SIG et le BIM desquels les standards CityGML et IFC sont respectivement issus. Ces derniers sont constitués par des structures offrant la possibilité de décrire toute sorte de composants d'un bâtiment et de son environnement, à travers des centaines de classes géométriques, topologiques mais surtout sémantiques. Ils marquent un tournant important dans lequel il est devenu impératif de travailler avec des modèles de haut niveau, riches en informations de toute nature, afin de permettre un usage générique. Beaucoup de travaux ont été réalisés et en général chacun d'eux vise à traiter des demandes spécifiques comme par exemple comment faire l'étude de l'énergétique d'un bâtiment à partir de son modèle IFC [14].

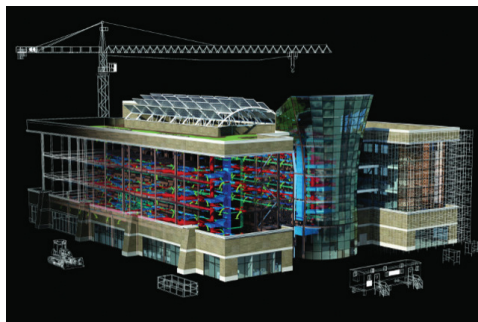
Cependant, la jeunesse des standards fait que seules les constructions récentes peuvent bénéficier de pareilles technologies dès le début de leur réalisation. S'est alors posé le problème des bâtiments déjà existants mais ne disposant pas ou peu de supports numériques. Plusieurs pistes de recherche ont été étudiées dans le but de proposer des méthodes de récupération ou d'enrichissement permettant d'atteindre des modèles de haut niveau à partir d'informations de plus bas niveau. Cela nous permet de différencier les approches en fonction de l'âge des bâtiments qui sont traités. Il existe ainsi des méthodes traitant des vieux bâtiments qui n'ont pas de supports numériques disponibles et d'autres traitant des bâtiments existants qui ont déjà une représentation de bas niveau (esquisses 2D, CAO 3D, etc.). Nous allons dans un premier temps présenter les types de modèles BIM et SIG traités dans nos travaux, puis nous étudierons les différentes méthodes de la littérature qui traitent ces données.

2.1 LES DIFFÉRENTS TYPES DE DONNÉES 3D DE BÂTIMENT

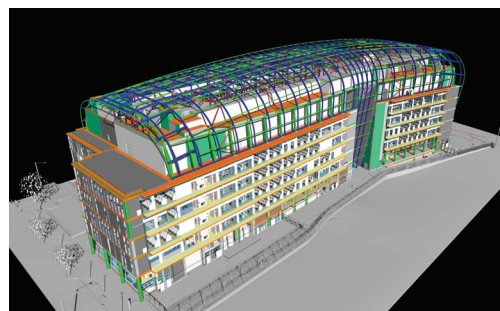
Comme explicité précédemment, les deux principaux formats utilisés pour la représentation 3D de bâtiments sont le IFC pour les BIM et le CityGML pour les SIG. Il existe également d'autres formats proposant une représentation géométrique proche de celle des standards, et qui s'y limitent (ils ne proposent pas ou peu de possibilités de représentation des informations topologiques et sémantique). Cependant, puisque notre méthode ne nécessite que l'information géométrique d'un modèle de bâtiment, ces formats nous sont aussi utiles. Nous présentons ici les spécificités des modèles BIM et SIG, à travers les formats qui les décrivent.

2.1.1 Modèles bâtiments de type BIM

Un modèle de type BIM s'intéresse à la représentation d'un bâtiment à l'échelle d'une construction unique, incluant éventuellement l'environnement immédiat de l'édifice modélisé. De ce fait il est possible de représenter tous les composants d'un bâtiment avec un niveau de détail très élevé. C'est le cas par exemple avec le format IFC qui permet de représenter un grand nombre d'éléments appartenant à la catégorie des AEC¹. En effet, il est non seulement possible de représenter les éléments architecturaux du bâtiment, à savoir les composants structuraux (murs, planchers, ouvertures, etc.) mais également des éléments plus intrinsèques liés à différents domaines d'ingénierie (câblages, tuyauteries, isolations, installations électriques, etc.). Les IFC vont encore plus loin en incluant des classes dédiées à la gestion et à la planification des installations qui sont des aspects très importants dans la gestion des projets de construction.



(a)



(b)

FIGURE 1 – Exemples de modèles BIM. (a) Image extraite de [58]. (b) Image extraite de [40].

1. Architecture, Engineering and Construction

Dans nos travaux, nous ne nous intéressons qu'à la représentation géométrique des éléments du modèle. Du fait de leur niveau de détail élevé, tous les éléments représentés dans les modèles BIM sont volumiques. Ainsi, chaque composant est un volume possédant sa propre description géométrique et les composants les plus complexes sont des assemblages de plusieurs éléments volumiques simples. Sur le plan de la description géométrique, les IFC présentent une spécificité, car elles offrent trois possibilités de représentation :

- *Constructive Solid Geometry* (CSG) ;
- *Sweeping* ;
- *Boundary Representation* (B-Rep).

La CSG est une représentation des objets à l'aide d'opérations booléennes (union, intersection, différence) combinant des objets solides simples (cube, cylindre, sphère, cône, ...). Le *Sweeping* consiste à représenter les géométries par une forme de base 2D et un chemin de balayage qui, lorsqu'il est suivi, donne une extrusion de la forme résultant sur le volume décrit. Ces deux approches ne constituent pas une représentation explicite de la géométrie. À l'opposé, la B-Rep, encore appelée représentation par bords, représente de manière explicite les géométries des volumes en les décrivant par leur enveloppe surfacique. Les objets sont ainsi décrits par un ensemble de faces délimitant les frontières du volume correspondant. La B-Rep a l'avantage d'être plus flexible, offre plus de possibilités de représentation et permet une utilisation directe des données.

Dans nos travaux, nous travaillons uniquement avec des données géométriques de type B-Rep. Par conséquent, tout format capable de décrire les géométries d'un bâtiment au format B-Rep et avec le formalisme volumique des BIM peut être traité avec nos méthodes. C'est le cas par exemple des formats de modèles 3D comme SKP développé par Trimble [147] ou Collada [161], qui sont aussi capables de représenter des modèles CAAO dans lesquels tous les composants sont volumiques.

2.1.2 Modèles bâtiments de type SIG

À la différence des BIM, les modèles SIG sont dédiés à la représentation de très grandes surfaces de terrains, incluant tout ce que ces terrains peuvent contenir : bâtiments, routes, végétation, cours d'eau, reliefs, etc. De ce fait, vu la quantité d'objets à représenter, il est nécessaire de définir plusieurs niveaux de détails pour permettre un usage plus adapté des données de ce type. Dans nos travaux, nous nous sommes uniquement intéressés au format CityGML pour la représentation des modèles de villes. Dans un modèle CityGML, la géométrie est entièrement représentée en B-Rep et l'OGC a défini cinq niveaux de détails

(LoD²) pour l’encodage des bâtiments, allant du plus grossier (LoD0) au plus détaillé (LoD4) comme illustré par la figure 2.

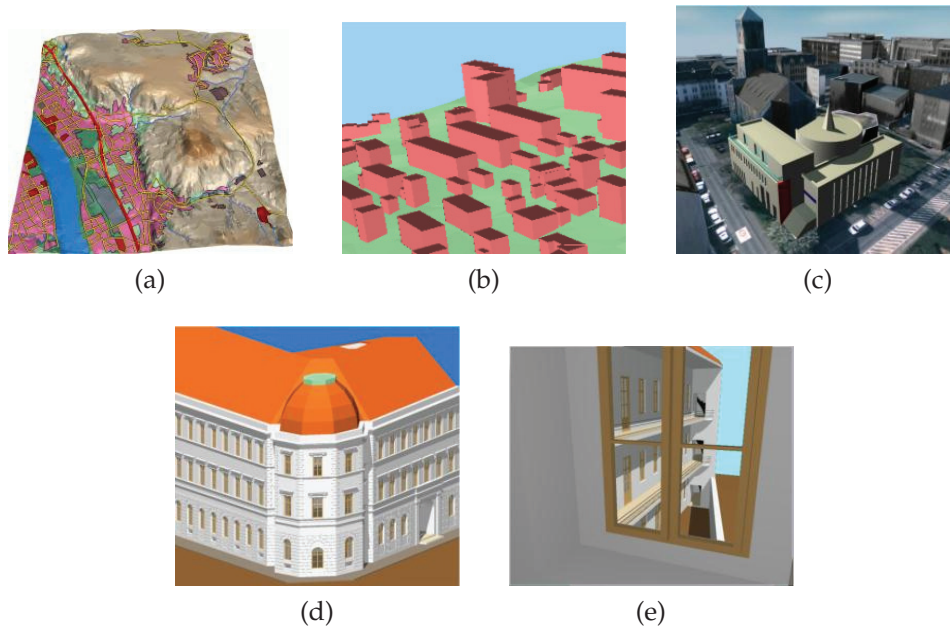


FIGURE 2 – Niveaux de détails pour la représentation des bâtiments dans un CityGML ; images extraites de [115]. (a) LoD0. (b) LoD1. (c) LoD2. (d) LoD3. (e) LoD4.

Le LoD0, qui est le niveau le plus grossier est essentiellement une représentation en 2,5D du modèle de terrain sur lequel des images aériennes ou des cartes peuvent être drapées (cf. figure 2a). Les bâtiments peuvent être représentés par des empreintes ou des polygones de toit projetés au sol. Le LoD1 correspond à un modèle de blocs comprenant des bâtiments prismatiques avec des structures de toits plats (cf. figure 2b). En revanche, les bâtiments d’un modèle LoD2 ont leurs structures de toits et leurs contours thématiquement différenciés (cf. figure 2c). Le LoD3 représente des modèles architecturaux avec des murs et des toits détaillés, y compris potentiellement les portes et les fenêtres (cf. figure 2d). Enfin le LoD4 complète un modèle LoD3 en ajoutant les structures intérieures des bâtiments (cf. figure 2e). Par exemple, les bâtiments en LoD4 peuvent comporter des pièces, des portes intérieures, des escaliers et des meubles.

Dans nos travaux, nous travaillons avec des modèles LoD2. Par ailleurs, nous n’utilisons pas directement des fichiers CityGML, mais nous extrayons simplement les géométries au format Wavefront OBJ [159] à partir des modèles. Nous allons à présent discuter des travaux qui ont été réalisés dans le cadre de la reconstruction et de l’enrichissement en informations des modèles 3D de bâtiment dans le domaine des BIM et des SIG.

2.2 TRAITEMENT DES BÂTIMENTS SANS SUPPORTS NUMÉRIQUES

Dans des domaines tels que la restauration de patrimoines historiques ou pour les vieux bâtiments, des modèles 3D doivent être créés sans aucun support numérique exploitable. À cet effet, plusieurs approches reposent sur les progrès de la vision par ordinateur et du traitement d'image afin de créer les données nécessaires avec des images haute résolution ou l'acquisition de nuages de points 3D en utilisant la photogrammétrie [165, 4] et des techniques de balayage laser [69, 136, 121], aériens ou terrestres.

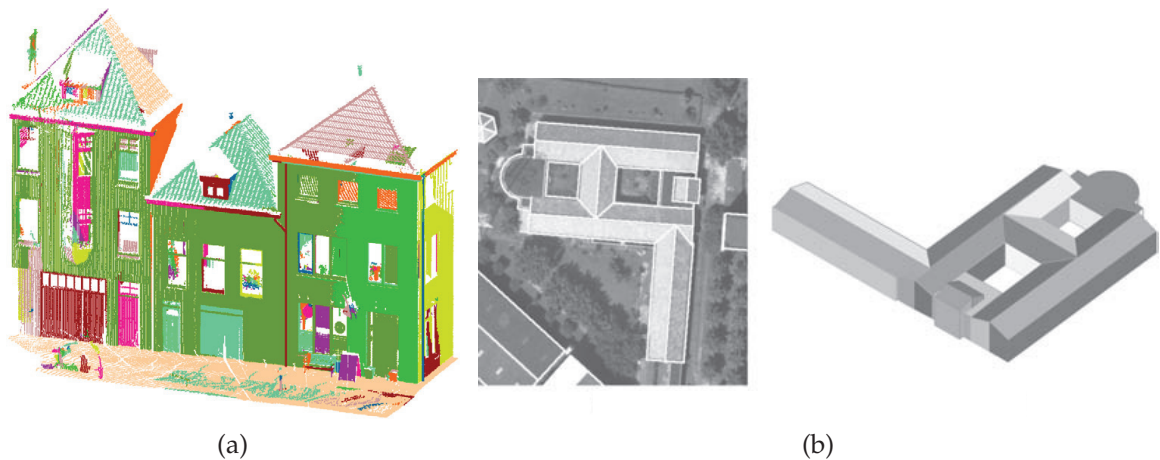


FIGURE 3 – (a) Modèle segmenté de la façade d'un bâtiment obtenu par scanner laser terrestre [121]. (b) Modèle SIG de bâtiment (droite) obtenu par extraction des toits à travers l'analyse d'images satellites (gauche) [165].

Ces méthodes se concentrent principalement sur la récupération de la géométrie et les données ont généralement besoin de plusieurs étapes de prétraitements avant usage (alignement planaire, recalage, fusion, etc.). Puisque plus d'informations sont nécessaires pour prétendre à des modèles de type BIM, certaines méthodes proposent d'étendre le processus à partir de nuages de points. Le principe consiste ainsi à rajouter automatiquement des informations topologiques et/ou sémantiques aux modèles reconstruits, jusqu'à atteindre des modèles de niveau BIM. Les données étant souvent limitées aux parties visibles des bâtiments, en fonction de la position des outils d'acquisition utilisés, il est souvent nécessaire de compléter la reconstruction par des opérations de type extension, extrusion, etc, afin d'obtenir des composantes volumiques. Les travaux s'intéressent ainsi soit à l'extérieur soit à l'intérieur des bâtiments, et dans certains cas combinent les deux [70, 136]. Nous présentons quelques-unes de ces approches dans les paragraphes suivants.

2.2.1 Travaux axés sur l'intérieur des bâtiments

Beaucoup de chercheurs se sont penchés sur les problèmes autour de la reconstruction d'environnement intérieur de bâtiment. Les données de départ peuvent être issues de scanners fixes placés aux endroits stratégiques du bâtiment ou de systèmes mobiles autonomes comme par exemples des caméras placées sur des robots (cf. figure 4) [145, 18]. Les applications qui en dépendent sont principalement liées à des problématiques de visualisation et de navigation [104, 68, 78]. La plupart des travaux s'attellent à reconstruire une géométrie du niveau d'un modèle polyédrique de type CAO à partir des nuages de points. Mais les modèles sont en général sans ou pauvres en définition explicite d'informations topologiques ou sémantiques.

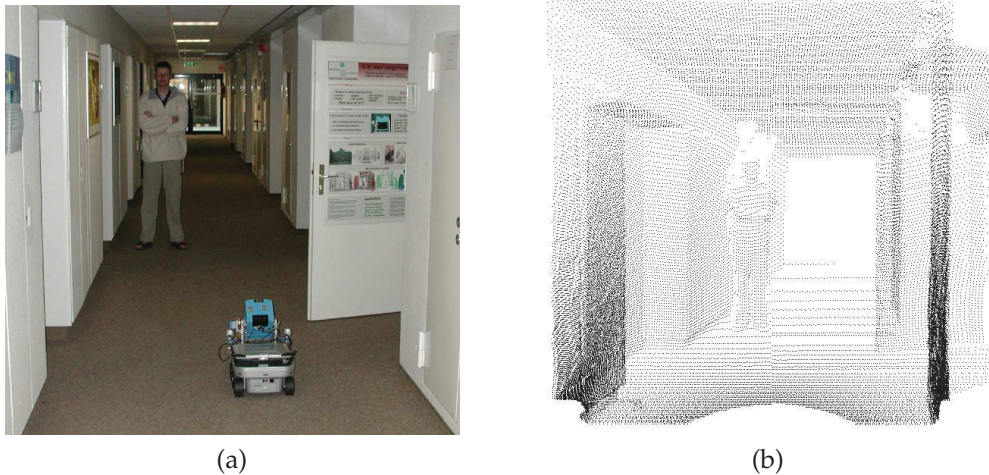


FIGURE 4 – Nuage de points obtenu par scanner monté sur robot mobile [111]. (a) Image de la scène scannée avec le robot mobile. (b) Nuage de points correspondant.

Budroni et Boehm [31] proposent ainsi la reconstruction automatique de scènes intérieures en modèles CAO. En se basant sur une méthode de balayage de plan, les structures verticales (murs) et horizontales (sols, plafonds) sont détectées à travers des histogrammes, mais ne recevront aucune étiquette sémantique. La projection au sol des plans détectés permet d'obtenir une subdivision cellulaire, dans laquelle certaines cellules vont être gardées en fonction du nombre de points qu'elles contiennent, puis fusionnées pour obtenir un polygone 2D correspondant à l'empreinte au sol du modèle. Ce dernier est alors extrudé pour former un polyèdre fermé qui correspond à l'intérieur d'un bâtiment (cf. figure 5). Une amélioration inclut la détection des portes [32] et confirme l'hypothèse des constructions de type *Manhattan World*³ [39], ce qui constitue une des limites

3. Hypothèse qui stipule que les principaux composants des bâtiments sont alignés suivant les axes cartésiens.

de la méthode.

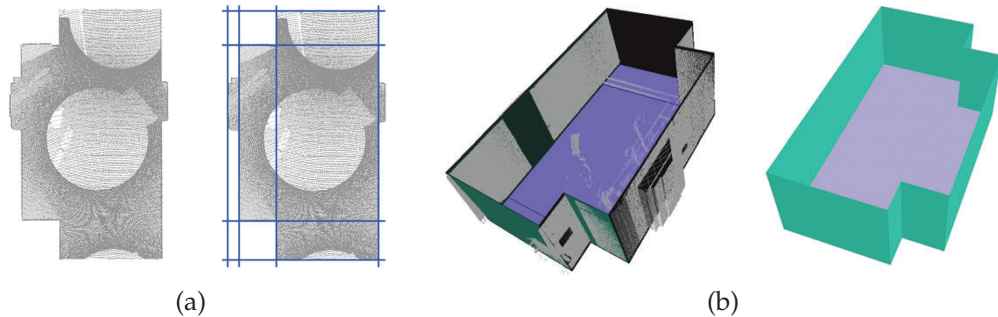


FIGURE 5 – Méthode de reconstruction décrite dans [31]. (a) Décomposition cellulaire sur le nuage de points projeté. (b) Modèle CAO obtenu.

Jenke et al. [79] présentent une méthode de reconstruction d'intérieur basée sur une approche statistique permettant d'extraire du nuage de points des formes cubiques, enrichies d'un graphe de connectivité. Les cubes sont par la suite maillés pour obtenir un volume fermé (cf. figure 6). Une approche similaire à [31] est proposée par Khoshelham et Díaz-Vilariño [83]. Ces derniers proposent une reconstruction itérative basée sur une grammaire de formes ayant pour formes de base des cubes unitaires qui sont connectés et fusionnés jusqu'à obtenir le volume décrit par le nuage de points d'entrée. Les pièces des modèles sont ainsi obtenues avec plus de précision et les murs et planchers sont déduits de manière implicite toujours en se basant sur les histogrammes de balayages de plans, qui impliquent une fois de plus l'hypothèse du *Manhattan World*.

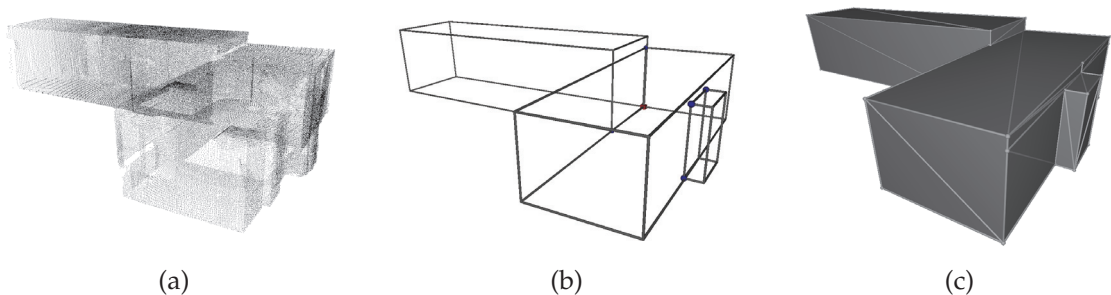


FIGURE 6 – Illustration de l'approche statistique de Jenke et al. [79]. (a) Données d'entrée. (b) Formes extraites. (c) Maillage final.

Dans le lot des approches procédant à une subdivision cellulaire, Mura et al. [105] proposent de reconstruire un modèle polyédrique précis à partir des environnements intérieurs complexes issues de données scannées encombrées de

points 3D. Une sélection des parois potentielles est effectuée en tenant compte des occlusions et est suivie par une segmentation des pièces par rapport à la projection 2D des parois détectées. Les polyèdres des pièces sont créés par l'intersection des plans muraux reconstruits avec les plans de sol et de plafond (cf. figure 7). Aucune information sémantique n'est cependant attribuée aux composants.

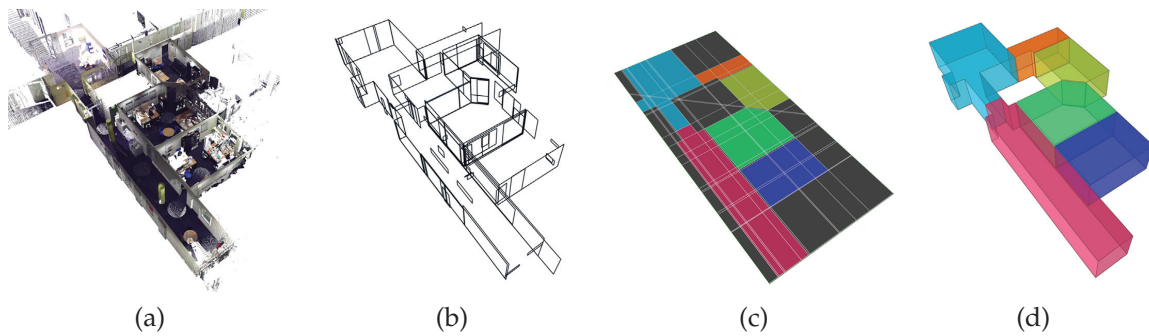


FIGURE 7 – Illustration de l'approche de Mura et al. [105]. (a) Données de départ. (b) Murs potentiels extraits. (c) Complexe cellulaire obtenu en projetant sur le plan du sol les murs potentiels. (d) Polyèdres extraits du complexe cellulaire.

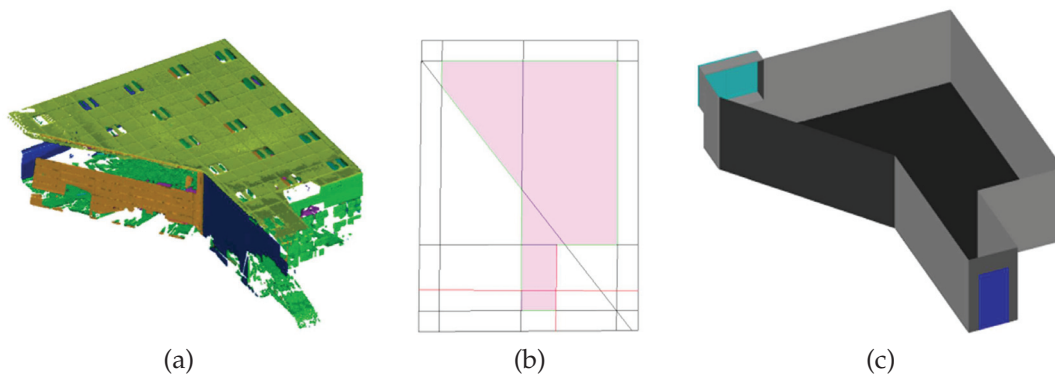


FIGURE 8 – Méthode de Previtali et al. [118]. (a) Résultat de la segmentation des données d'entrée. (b) Complexe cellulaire induit et intérieur détecté par lancer de rayons. (c) Modèle 3D final reconstruit.

D'autres travaux se sont plus attachés à apporter de l'information sémantique avec l'identification des composants intérieurs du bâtiment directement à partir du nuage de points. Cela concerne principalement l'étiquetage sémantique des murs, planchers, portes et fenêtres. Previtali et al. [118] présentent une approche similaire à [105] avec l'avantage d'inclure de l'enrichissement sémantique dans le processus de reconstruction. Des méthodes de segmentation permettent d'extraire les surfaces planes qui servent ensuite à la détection de l'empreinte au sol. Une décomposition cellulaire est opérée sur cette dernière, et les cellules sont étiquetées grâce à une technique de lancer de rayons. Puis un modèle polyédrique

des pièces, comportant les ouvertures, est alors créé (cf. figure 8).

Nüchter et al. [111] proposent de leur côté une reconstruction de scène en maillage contraint à partir de nuage de points acquis par un robot mobile. Un réseau sémantique basé sur des heuristiques (orthogonalité, parallélisme et positions relatives des éléments) est défini et utilisé comme connaissance *a priori* pour étiqueter des plans extraits des données de départ. Le modèle qui en ressort est ensuite raffiné en se basant sur les contraintes inhérentes à la sémantique définie (cf. figure 9). Cette sémantique est cependant limitée aux entités planaires du modèle.

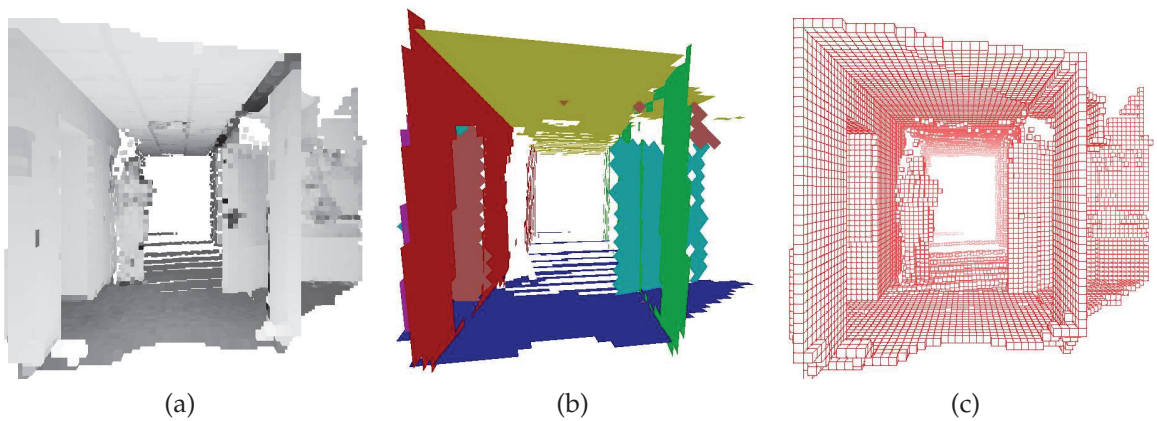


FIGURE 9 – Images extraites de [111]. (a) scène rendue avec des valeurs de réflectance à partir du nuage de points de la figure 4b. (b) Plans extraits avec interprétation sémantique. (c) Maillage contraint final.

Xiong et al. [164] proposent une méthode pour identifier et modéliser les principaux composants structurels visibles d'un environnement intérieur (murs, planchers, fenêtres, etc.) à partir de données de type nuage de points 3D brutes, malgré d'important encombrements et occlusions. Les points sont transformés en voxels et des surfaces planaires sont extraites et identifiées par des étiquettes uniques basées sur les caractéristiques uniques détectées ainsi que leurs relations contextuelles. Une analyse plus approfondie est ensuite effectuée afin de reconnaître les ouvertures (cf. figure 10).

Plus récemment, Ochmann et al. [113] ont introduit une approche automatique de structuration sémantique de nuages de points représentant les pièces intérieures. Les auteurs commencent avec plusieurs scans 3D recalés, détectent les structures planes et affilient initialement chaque point à une pièce donnée en se basant sur les positions des scanners utilisés. L'étiquetage des points est ensuite mis à jour par un processus itératif qui vise les points présents dans plusieurs scans et qui utilise un modèle probabiliste afin d'affecter ces points aux

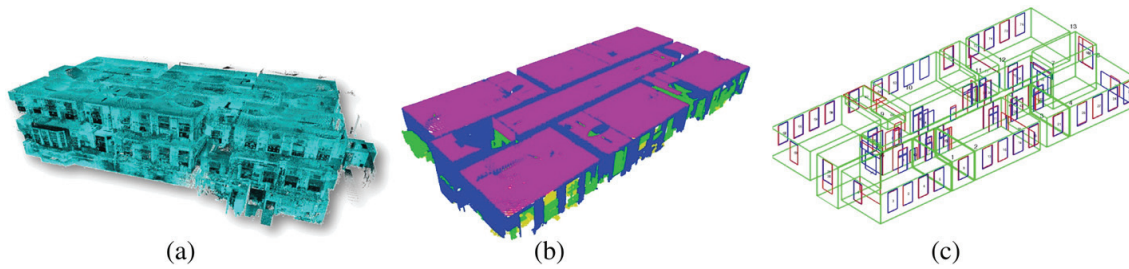


FIGURE 10 – Vue d’ensemble de l’algorithme présenté dans [164]. (a) Nuage de points après recalage. (b) Identification contextuelle des principales composantes : murs (bleu), plancher (jaune) et plafond (magenta) ; les zones encombrées sont en vert. (c) Modèle surfacique détaillé avec identification des portes et fenêtres.

pièces qui conviennent le mieux. Les portes sont extraites en comparant l’original et le nouvel étiquetage des points, de même que le graphe topologique reliant les pièces (cf. figure 11).

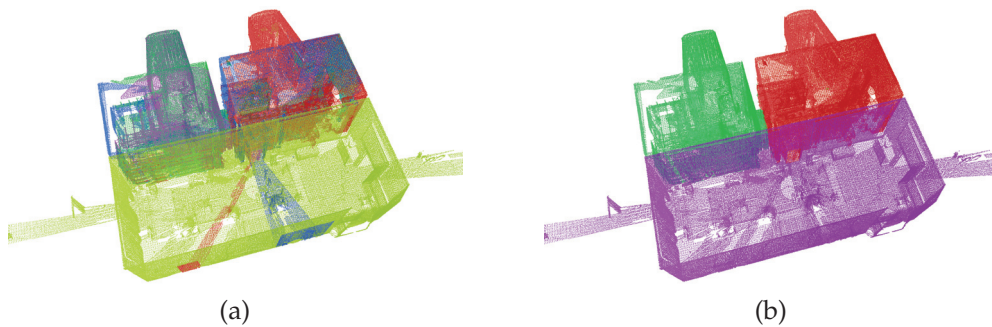


FIGURE 11 – Deux étapes de la méthode présentée dans [113]. (a) Étiquetage initial des points (une couleur par scan) après détection des structures planaires. (b) Ré-étiquetage final après correction.

2.2.2 Travaux axés sur l’extérieur des bâtiments

Les données obtenues à travers des procédés de balayage laser aériens ou terrestres sont les plus utilisées en ce qui concerne la reconstruction de l’extérieur des bâtiments. Nous distinguons principalement les méthodes qui se basent sur des capteurs laser aéroportés de type LiDAR (Light Detection And Ranging), dont le traitement des données générées constitue typiquement une des problématiques de recherche de la communauté SIG. Les méthodes qui consistent à faire usage de scanners laser fixes ou mobiles au sol permettent quant à elles de reconstruire des bâtiments ou parties de bâtiments à savoir la façade. Avec l’avancée des techniques de vision par ordinateurs, les données des scanners

sont souvent appuyées par des images 2D afin de reconstruire des modèles plus robustes et plus précis.

Reconstruction d'environnements urbains

Les nuages de points obtenus avec le LiDAR procurant à la fois une représentation du terrain et de tout ce qui est à sa surface, l'enjeu repose dans un premier temps sur la classification des points en fonction de leur appartenance au sol ou aux autres composantes (végétation, bâtiments, etc.). Ceci a mené à la distinction des modèles en tant que Digital Terrain Model (DTM) pour la partie des données représentative du terrain ou en tant que Digital Surface Model (DSM) pour tout ce qui se trouve sur la surface [84, 119, 64, 77, 86]. Ensuite, toutes les méthodes intervenant sur ce genre de données ont plus ou moins en commun le fait de s'appuyer sur la détection des toits afin de distinguer les bâtiments de manière plus robuste.

Rottensteiner et Briesse [129] présentent ainsi une méthode permettant d'extraire les bâtiments en interpolant un DSM et un DTM à résolution convenable à partir de données LiDAR. Un premier masque pour repérer les bâtiments est obtenu en soustrayant le DTM du modèle global et en s'appuyant sur un seuil de hauteur. Le masque est ensuite affiné à l'aide d'opérateurs morphologiques binaires appuyé par une analyse des variations locales des vecteurs normaux aux faces du DSM. Enfin une segmentation permettant la détection de régions planaires est effectuée. Les relations topologiques de ces dernières sont prises en compte à travers un diagramme de Voronoï et les régions de Voronoï obtenues font office de toitures à partir desquelles un modèle polyédrique au format VRML [160] est généré, comme l'illustre la figure 12a. Sohn et al. [134] proposent une approche similaire avec une amélioration de la précision du modèle final généré. Leur méthode s'appuie sur des arbres de partitions binaires de l'espace pour reconstruire les toits à partir des éléments linéaires entre leurs surfaces adjacentes. Il en résulte ainsi une meilleure description des bâtiments avec la génération de modèles polyédriques beaucoup plus précis (cf. figure 12b).

Toujours dans le but d'améliorer la précision et le niveau de détails des modèles produits, un nombre considérable de travaux proposent des approches combinant des images aériennes et des données acquises par balayage laser. La génération de modèles simplement à partir d'images constitue à elle toute seule une piste de recherche intensivement explorée [92, 71, 133, 112]. Cependant, la combinaison des images et des nuages de points 3D s'avère être le meilleur compromis pour combler les lacunes des deux types d'approches.

C'est dans cette optique que Haala et Brenner [67] proposent deux méthodes de collectes de données pour des environnement urbains. La première combine

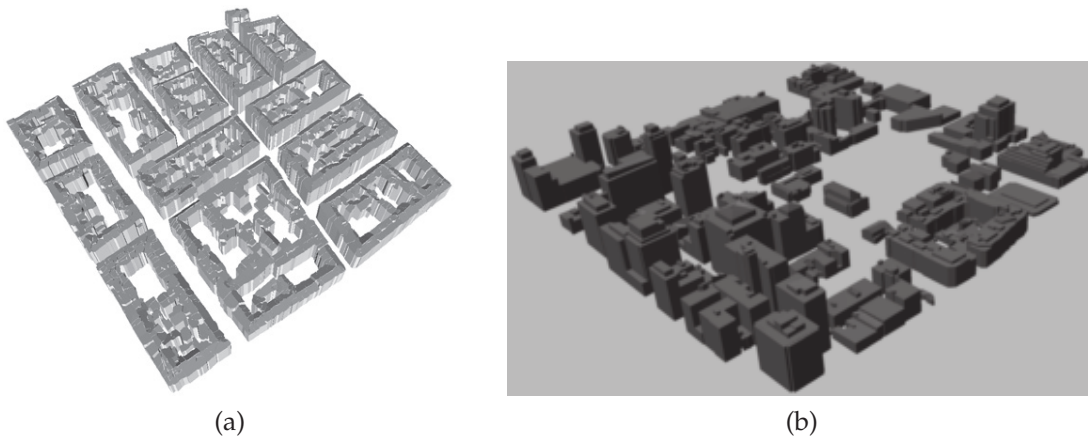


FIGURE 12 – Reconstruction de modèles polyédriques 3D de villes virtuelles à partir de données LiDAR. (a) Résultat de la méthode décrite dans [129] avec une bonne séparation des bâtiments et du terrain. (b) Modèle présentant des toits reconstruits avec un peu plus de détails [134].

des images multispectrales et le nuage de points produit par scanner laser aéroporté dans une classification intégrée pour l'extraction des bâtiments, des arbres et des zones couvertes d'herbe (cf. figure 13). Ces caractéristiques sont représentées comme différentes régions lors de la séparation des données spectrales. Cette dernière opération est améliorée par l'utilisation du DSM comme canal additionnel durant la classification, permettant ainsi de tirer profit de l'information de la hauteur qu'il fournit. La seconde approche utilise les données laser et des plans 2D des bâtiments au sol pour obtenir une reconstruction 3D, similairement à ce qui sera proposé plus tard par Vosselman et Dijkman [151] (cf. figure 14). L'hypothèse est faite par les auteurs que les plans décrivent parfaitement la projection au sol des bordures des toits. Les primitives 2D décrivant les toitures sont ensuite ajustées au modèle DSM par la méthode des moindres carrés afin de retrouver leurs formes et hauteur originales. Des modèles assez détaillés peuvent ainsi être obtenus automatiquement et ce malgré des données laser relativement faibles en densité de points.

En effet dans ce type d'approches, il s'agit le plus souvent de régler des problèmes de recalage entre les données 3D des scanners laser et les images 2D [95, 96], afin de combler le manque de précision des nuages de points à l'aide de la résolution et des informations visuelles plus riches des images, qui bénéficient à leur tour de l'information de la profondeur. Cheng et al. [36] proposent une reconstruction en mettant l'accent sur la détermination des orientations principales des bâtiments, ce qui contribue à la robustesse des segments extraits à partir des images représentant les frontières des toits. L'exactitude de ces dernières est assurée par une méthode de sélection basée sur l'analyse de la densité des données LiDAR et un partitionnement en k -moyennes, permettant ainsi de réduire les segments parasites aux frontières (cf. figure 15). Les auteurs utilisent

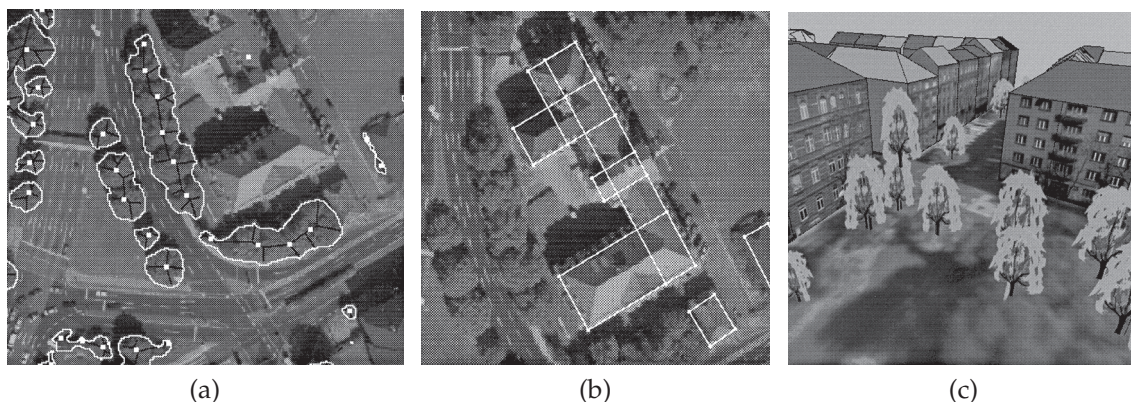


FIGURE 13 – Méthode de Haala et Brenner [67]. (a) Usage des régions classées "arbre" pour la détection de la végétation. (b) Plan au sol décomposé en plusieurs parts rectangulaires. (c) Modèle 3D de ville virtuelle généré.

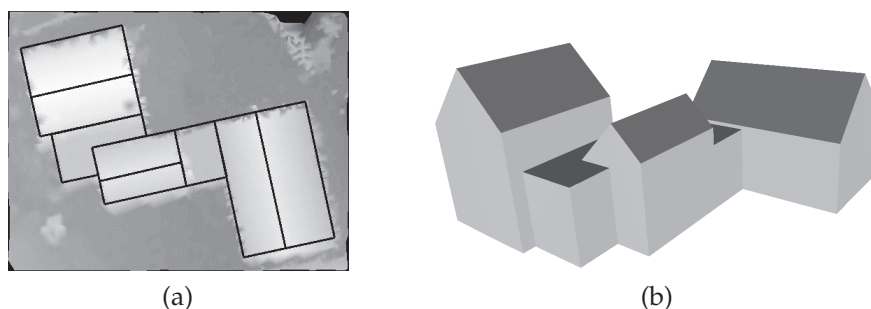


FIGURE 14 – Approche de Vosselman et Dijkman [151]. (a) Plan au sol partitionné et raffiné en fusionnant les segments appartenant aux faces coplanaires. (b) Modèle 3D reconstruit.

la méthode de Zhang et al. [169] pour la détection des surfaces 3D des toits, avec une amélioration qui consiste à utiliser un ajustement basé sur du RANSAC [61] plutôt que sur la méthode des moindres carrés.

Plus récemment, Demir et Baltsavias [49] introduisent une approche axée sur la détection des toits grâce à la combinaison de quatre méthodes, suivie de la reconstruction du modèle 3D correspondant. Les toits sont supposés planaires, mais la méthode d'ajustement utilisé (RANSAC) donne la possibilité d'inclure les toitures de forme quelconques à travers les paramètres d'estimation. La méthode voit ses limites lorsque des zones de végétations denses entourent un bâtiment (cf. figure 16). Zhang et al [170] s'attaquent à leur tour à la modélisation des toits des bâtiment mais proposent de les représenter par des primitives paramétriques et de définir leurs fonctions-coûts en utilisant simultanément les données LiDAR et les images aériennes. La reconstruction 3D est ainsi rapporté à un problème d'optimisation des paramètres des primitives, ce qui a pour conséquence de minimiser de manière uniforme les erreurs de reconstruction sur les deux

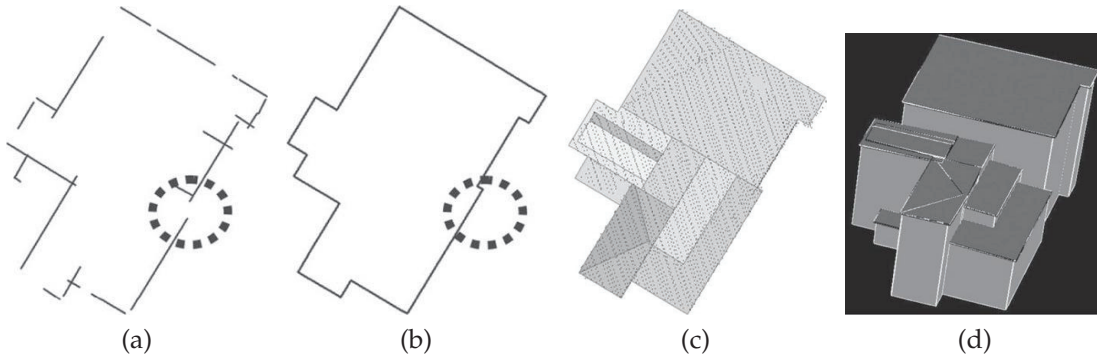


FIGURE 15 – Illustration de la méthode de Cheng et al. [36]. (a) Segments retenus pour représenter la frontière. (b) Fermeture de la frontière. (c) Reconstruction des frontières intérieures de toiture et ajustement aux données LiDAR. (d) Modèle polyédrique 3D extrait.

types de données. Cependant la méthode reste orienté modèle et conduit donc à une baisse de précision géométrique lorsque les primitives sont trop différentes des vraies données. La figure 17 illustre le résultat de cette dernière approche.

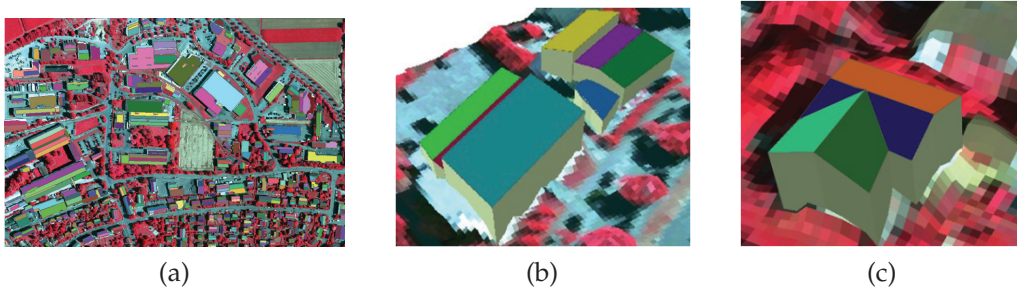


FIGURE 16 – (a) Toits détectés avec la méthode de Demir et Baltsavias [49]. (b) et (c) Zoom sur des toits. Chaque face représente une surface de toit et possède sa propre couleur.

Lafarge et al. [87] utilisent un autre type de représentation hybride pour la modélisation de milieux urbains et qui consiste à combiner des primitives géométriques 3D aux maillages issus des nuages de points. L'approche est adoptée plus tard par Lafarge et Mallet [85] afin de combiner des maillages irréguliers représentant des composants de toitures avec des primitives 3D (plans, cylindres, sphères, cônes) décrivant des sections régulières de toit. Les auteurs procèdent d'abord à la classification du nuage de points pour distinguer les bâtiments, les arbres, le sol et les bruits, avant d'extraire les segments formant les bâtiments et les faces formant les toitures. Ces primitives ainsi que les autres composants du modèle sont ensuite arrangés sur une carte planimétrique dans le but de produire une représentation commune plus dense. Enfin, par le biais de corres-

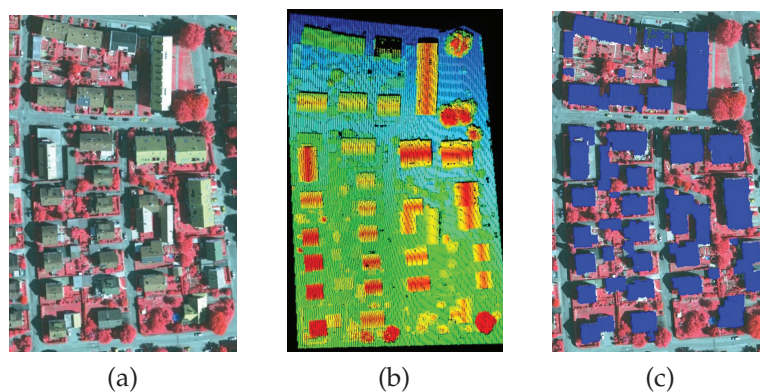


FIGURE 17 – Images provenant de Zhang et al [170]. (a) Image digitale aérienne. (b) Données LiDAR avec une carte couleur en fonction de la hauteur des points. (c) Toits détectés (bleus).

pondance avec des motifs pour les arbres, de maillage pour le sol et de la combinaison hybride pour les bâtiments, une représentation 3D détaillée est produite tout en conservant la classification sémantique. La figure 18 permet d’illustrer l’ensemble du processus.

Reconstruction de façades

Les nuages de points acquis avec des scanners fixes ou mobiles terrestres couvrent en général une rangée de paysage plus restreinte que les scanners aéroportés. Les données ainsi obtenues sont de ce fait plus adaptées à la reconstruction de bâtiments seuls plutôt que de modèles de villes. Un nombre conséquent de travaux se sont consacrés à la reconstruction de façade à partir de données LiDAR ou combinées à des images 2D [38, 155, 22, 9]. Nous remarquons cependant que les méthodes faisant usages de scanners mobiles permettent généralement de couvrir des zones de la taille d’une rue ou d’un quartier [63, 15].

L’enjeu ici repose sur la détection de surfaces planaires dans les nuages de points, à l’image des méthodes de reconstruction d’intérieur (cf. section 2.2.1). Ainsi Bauer et al. [12] proposent la détection des plans dominants de la façade sur un nuage de points dense grâce à une méthode de segmentation basée sur du RANSAC. Les plans 3D obtenus font ensuite l’objet d’un partitionnement en polygones rectangulaires qui sont catégorisés en tant que portes, fenêtres ou balcons en fonction de la densité des points du nuage à leur niveau. Il en résulte un modèle polygonal texturé et représentant la façade du bâtiment (cf. figure 19b). Bien que le nuage de points en question soit obtenu à travers des correspondances de points entre plusieurs images, l’approche reste adaptée à des données de type LiDAR. Elle requiert cependant une donnée aditionnelle, à savoir au moins une image de la scène dans laquelle les orientations extérieur et intérieur

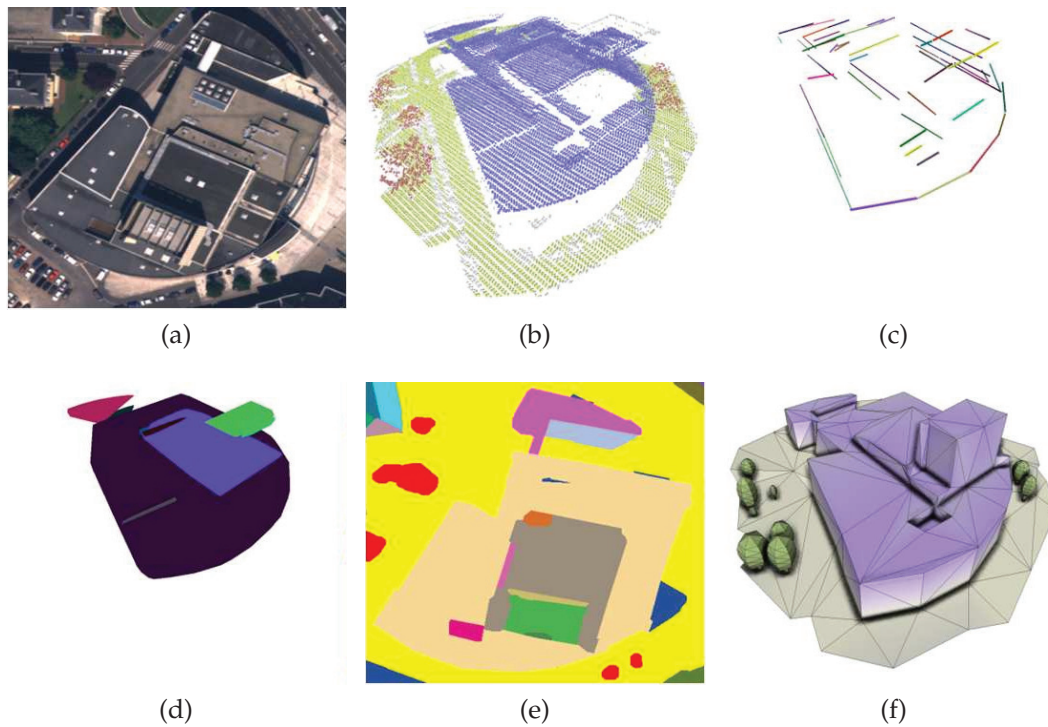


FIGURE 18 – Méthode de reconstruction de Lafarge et Mallet [85]. (a) Image aérienne du territoire étudié. (b) Classification non supervisée du nuage de points. (c) Segments 3D extraits. (d) Primitives surfaciques extraites. (e) Carte planimétrique. (f) Modèle 3D obtenu.

sont connues, en plus des points de fuite (cf. figure 19a).

Similairement, Pu et Vosselman [122] font eux aussi usage de techniques de segmentation mais visent plutôt l'extraction directe de caractéristiques communes sur les données de scanner laser terrestres (murs, portes, fenêtres, etc.). Une méthode de type surfaces planes croissantes est ainsi adoptée sur le nuage de points [152]. Il en ressort un ensemble de régions planes qui sont ensuite catégorisées et identifiées en se basant sur un ensemble de contraintes définies (taille, position, orientation, etc.). L'algorithme de segmentation est cependant dépendant de plusieurs paramètres qui influent fortement sur les résultats obtenus. Les auteurs ne précisent par ailleurs aucun étiquetage sémantique sur les régions identifiées.

Les principales composants de la façade qui sont étudiés restent les murs et les fenêtres, la densité de points étant supposée plus importante pour les premiers que pour les dernières dans les nuages de points [120, 125]. Une autre approche consiste à faire usage de règles basées sur des grammaires de formes afin de reconstruire les façades des bâtiments à travers les données laser [124, 125, 153]. Becker et Haala [15] proposent ainsi une méthode totalement automatique pour la



FIGURE 19 – Résultat de la segmentation dans [12]. (a) Intersections des lignes provenant de deux points de fuites distincts, formant des polygone rectangulaires. (b) Les polygones validés forme le modèle polygonal final, et les parties des images correspondantes sont recadrées pour éviter la distorsion de la texture.

modélisation géométrique de façade 3D à partir de données de scanners mobiles. Les parties les mieux couvertes par le balayage laser sont d’abord reconstruites puis sont utilisées pour la définition des règles de grammaires. Ces dernières constituent ensuite une connaissance *a priori* permettant de combler les parties les moins denses et même de modéliser des parties non visibles (cf. figure 21b). Cela est rendu possible notamment par l’usage d’une approche initialement introduite par Böhm et al. [24] et qui consiste à combiner les modèles produits par des techniques de scanner aéroportés avec les nuages de points de scanners terrestres des façades. À l’issue d’un recalage des données, les auteurs obtiennent ce qu’ils appellent une *LASERMAP* qui permet de retracer les détails des façades scannés sur les modèles initialement lisses et grossiers des bâtiments (cf. section 2.2.2), comme l’illustrent les figures 22a et 21a. Cela permet au final de rajouter des façades beaucoup plus réalistes avec des fenêtres plus détaillées (cf. figures 22c et 21b), permettant ainsi de raffiner les modèles initiaux.

2.2.3 Discussion

Nous constatons ainsi qu’il existe bon nombre de solutions permettant de procurer à des bâtiments sans supports numériques des modèles 3D opérationnels pouvant atteindre le niveau de détails des modèles CAO, et qui sont adaptés à des applications ciblées. Cela se confirme principalement avec les modèles SIG de villes virtuelles qui tirent bénéfice des méthodes de scanners laser aéroportés. Le constat qui en ressort reste tout de même le fait que les méthodes hybrides,

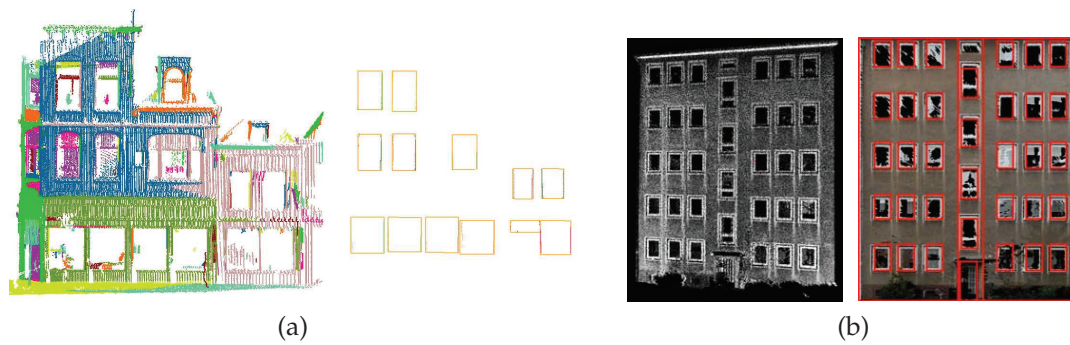


FIGURE 20 – Nuage de points (gauche) et fenêtres extraites (droite) respectivement avec les méthodes de (a) Pu et Vosselman [120] (avec segmentation du nuage de points) et (b) Ripperda et Brenner [125].

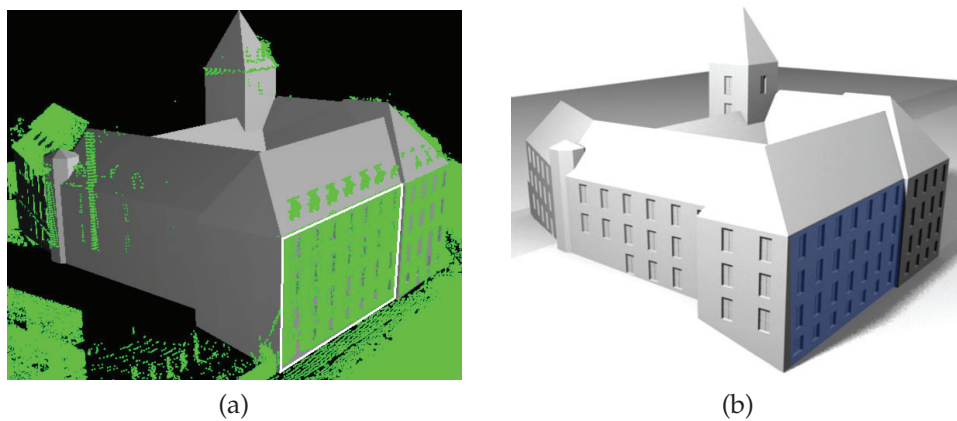


FIGURE 21 – Approche de Becker et Haala [15]. (a) Alignement des données du scanner laser terrestre et d'un modèle 3D grossier. (b) Rajout de la façade et extension sur les parties non visibles du nuage de points.

combinant plusieurs types d'acquisition (scanners aéroportés, terrestres, fixes, mobiles, images 2D, etc.) sont les plus prometteuses et aboutissent en général sur des modèles 3D plus précis et détaillés.

Par ailleurs, nous noterons aussi la forte dépendance de toutes ces méthodes à la qualité des données d'entrée et la limitation des reconstructions proposées à de simples modèles surfaciques du fait de la non visibilité de l'intérieur des bâtiments. En effet, bien que d'intenses efforts soient consacrés à la compensation de telles zones, il est difficile de reconstruire de manière correcte ce dont nulle information n'est connue sans altérer la réalité. Et malgré l'ajout d'informations topologiques et/ou sémantiques, les niveaux de détails restent encore limités pour prétendre à de vrais modèles de type BIM. C'est la raison pour laquelle il serait intéressant d'explorer la piste de la combinaison des reconstructions intérieures et extérieures des bâtiments pour tendre vers des modèles 3D

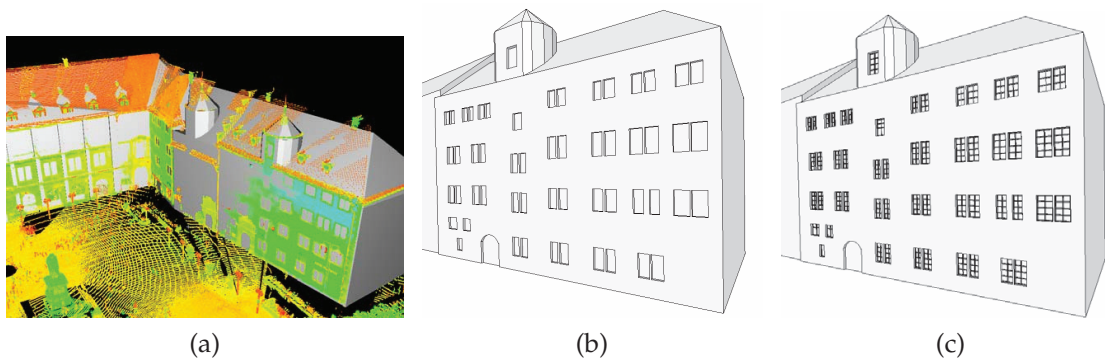


FIGURE 22 – Amélioration des modèles par la méthode de Böhm et al. [24]. (a) Alignement des points du nuage 3D et du modèle de base. (b) Rajout de fenêtres simples sur la façade du modèle. (c) Raffinement des détails des fenêtres.

volumiques complets et précis.

D'intéressantes études bibliographiques concernant la création de modèles 3D pour des bâtiments sans supports numériques préalables peuvent être trouvées dans [141], [154] et [150]. Nous allons à présent étudier les travaux consacrés à des constructions disposant déjà de support numériques.

2.3 TRAITEMENT DES BÂTIMENTS AVEC SUPPORTS NUMÉRIQUES

À la grande différence des bâtiments étudiés dans la section 2.2, beaucoup d'autres constructions plus récentes ont pu tirer profit des avancées en modélisation numérique et bénéficient ainsi de représentations sous formes de plans numériques 2D ou encore de modèles CAO 3D. De ce fait, l'objectif premier des approches traitant avec ce type de données est la récupération des informations disponibles puis leur enrichissement, ou correction dans certains cas.

En effet, les données en question sont pour la plupart bien fournies en information géométrique. L'enjeu consiste donc à enrichir les données déjà disponibles, principalement en informations topologiques et sémantiques afin d'en faire de vrais modèles BIM et de les rendre ainsi utilisables pour un grand nombre d'applications. Ceci permet d'ailleurs de faire le liens avec les méthodes traitant des constructions sans supports numériques, car une fois que ces dernières obtiennent une représentation 3D exploitable, les méthodes présentées dans cette section peuvent prendre le relais.

2.3.1 Bâtiments possédant des supports de type esquisses ou plans 2D

Les supports 2D des bâtiments ne sont pas toujours disponibles sous format numérique. En effet, une quantité considérable des plans architecturaux sont sous format papier, format qui est d'ailleurs resté prisé par un bon nombre d'architectes bien longtemps après l'avènement des outils CAO. De ce fait, les premiers travaux visant à exploiter ces dessins consistent essentiellement à convertir les plans 2D sur papier en plans vectoriels numériques grâce à des techniques de traitement d'images et de reconnaissance de formes [42, 3, 73, 166]. L'implication de l'interprétation de plusieurs figures complexes dans la tâche rend le problème très difficile à entièrement automatiser. De ce fait, beaucoup d'outils proposés nécessitent encore une intervention manuelle, laissant le sujet de recherche encore ouvert [166].

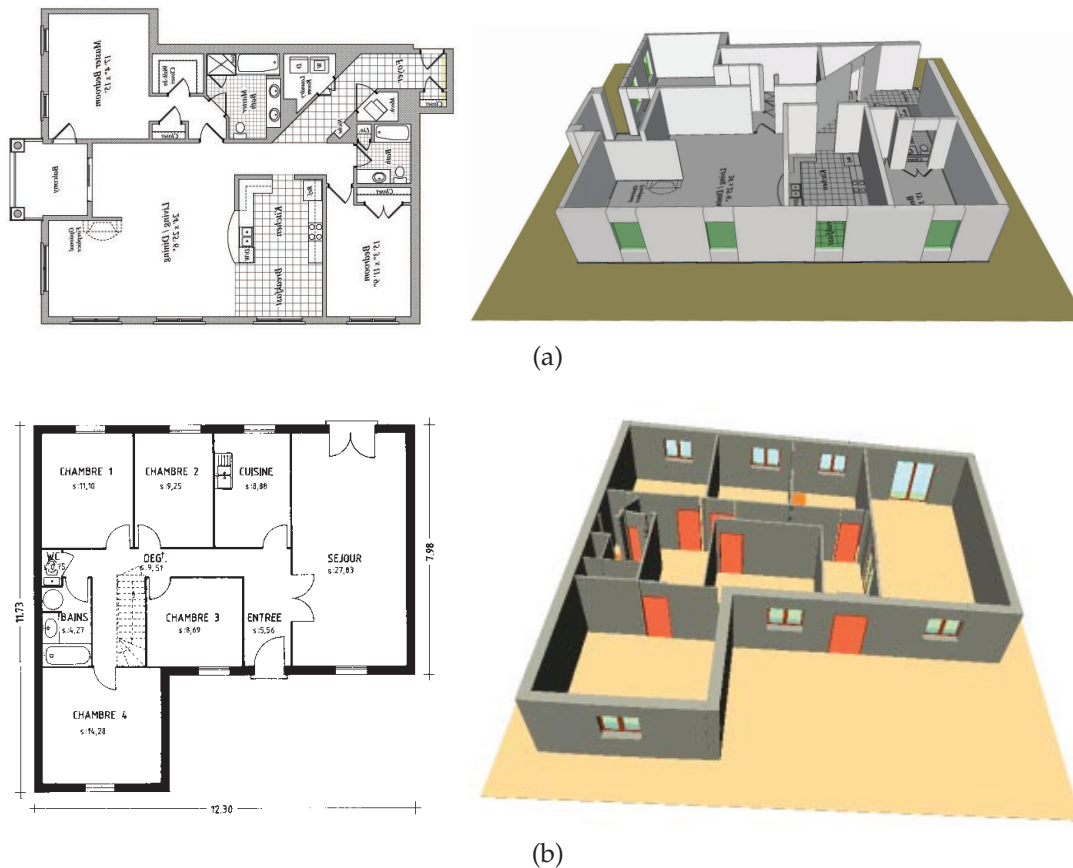


FIGURE 23 – Reconstruction de modèles 3D de bâtiments (droite) après lecture et interprétation de plans 2D (gauche). (a) Images issues de Yin et al. [166]. (b) Résultats de l'approche de Dosch et al. [54].

Une fois les modèles vectoriels des plans 2D obtenus, plusieurs études ont été menées afin d'investiguer sur la reconstruction de modèles 3D à partir de ces plans numériques 2D, pendant les deux dernières décénies [91, 54, 98]. Les

approchent reposent globalement sur le même principe, à savoir l'interprétation des données présentes dans un premier temps, extraction des composants ciblés (mur, ouvertures, etc.) puis extrusion des objets 2D pour obtenir un modèle final 3D (cf. figure 23). La différence se fait ainsi sur le niveau de détail et l'enrichissement en information des modèles reconstruits.

Lu et al. [99] présentent une méthode fournissant une analyse approfondie des données géométriques des plans 2D et proposent ainsi un système de détection des symboles architecturaux sur lesquels ils se reposent pour reconstruire les modèles 3D correspondants. Les auteurs mettent en place une série d'algorithmes de reconnaissance visant à récupérer les informations sur les dimensions, les systèmes de coordonnées et les formes des composantes structurelles des modèles traités. Mais aucune information topologique ou sémantique n'est produite, limitant ainsi l'usage des modèles 3D obtenus.

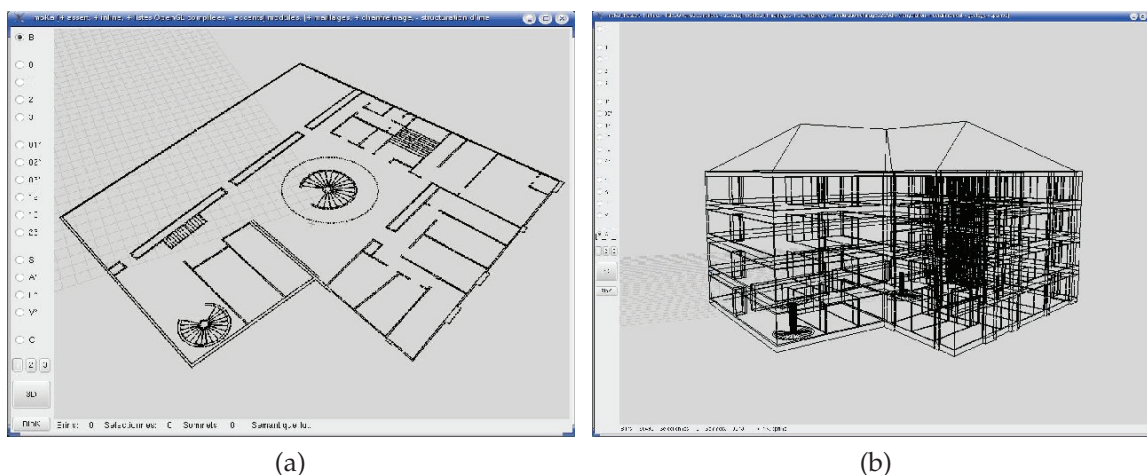


FIGURE 24 – Méthode de reconstruction de Horna et al. [76]. (a) Nettoyage et reconstruction topologique des entités géométrique sur les plans 2D. (b) Extrusion pour l'obtention du modèle 3D et ajout de toit.

À contrario, Horna et al. [76, 75] introduisent une approche permettant de récupérer des informations topologiques et sémantiques directement à partir de plans 2D. Les composantss 3D du bâtiment sont obtenus par un procédé d'extrusion effectué après élimination des incohérences géométriques et une reconstruction topologique des faces 2D (cf. figure 24). Les auteurs assurent ainsi une subdivision volumique du modèle et associent l'information sémantique aux volumes obtenus. Cependant, la méthode est limitée à des étages superposées identiques pour les immeubles.

Dans le domaine des SIG, des études ont aussi été menées afin d'exploiter les données 2D de cadastres et d'en faire des cadastres 3D, plus à même de

représenter les habitations dans leur contexte réel [137, 82, 5]. Ying et al. [167] proposent ainsi de construire un modèle topologique 3D complet à partir de cadastres 2D, afin de représenter le corps des bâtiments ainsi que leurs relations spatiales. Leur méthode d’extrusion des polygones 2D tient donc compte des relations de voisinage et est couronnée par plusieurs opérations spatiales. Une des limites de ce type d’approche est que les modèles 3D finaux peuvent être finalement assez loin des constructions réelles (cf. figure 25), de ce fait l’usage principal reste visuel [132].

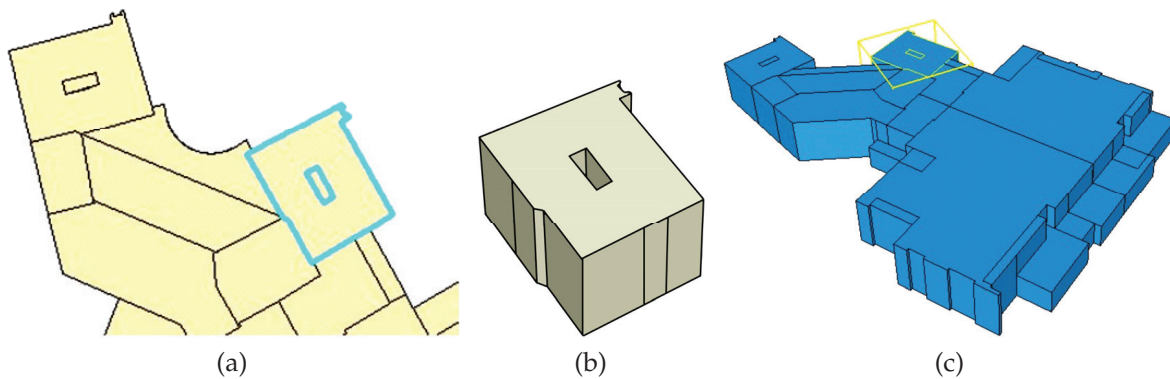


FIGURE 25 – Génération de cadastre 3D par Ying et al. [167]. (a) Cadastre 2D de départ, avec identification d’un polygone possédant un trou. (b) Extrusion isolée du polygone avec prise en compte topologique du trou. (c) Modèle 3D obtenu à partir de l’extrusion de tous les polygones.

2.3.2 Bâtiments possédant des modèles de type CAO

Malgré la disponibilité d’un grand nombre de modèles CAO 3D de bâtiments, très peu de travaux ont été consacrés à l’enrichissement de ce type de données. En effet, bien que l’étude de l’extraction de formes à partir de maillage 3D ait été intensément menée, elle ne s’est pas intéressée aux représentations architecturales en particulier, mais plutôt aux pièces mécaniques ou aux modèles d’êtres vivants [23, 123, 8, 16]. Les approches ainsi proposées reposent généralement sur une segmentation du modèle visant à identifier sémantiquement et de manière pertinente les parties qui le composent [174, 2, 10]. L’information topologique est quant à elle plutôt exploitée par les méthodes orientées sur l’analyse de graphe [56, 17].

Wessel et al. [157] proposent de retrouver des formes dans des modèles architecturaux 3D qui se présentent comme des ensembles de polygones. Les auteurs identifient les planchers et les plafonds en détectant les faces planaires parallèles au sol (cf. figure 26a), et en les regroupant sur la base de seuils de distances définis. Les empreintes au sol des murs sur les planchers sont ensuite utilisées pour

définir les pièces (cf. figure 26b). Un graphe de connectivité de ces dernières est ainsi construit et permet de détecter les portes et les fenêtres.

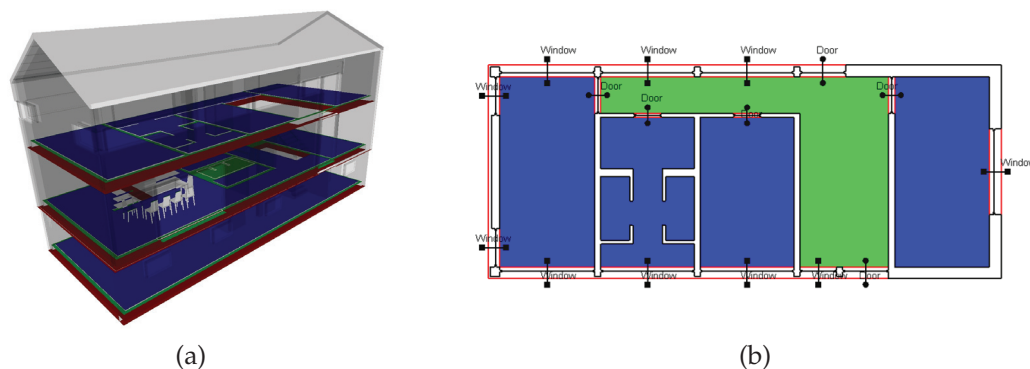


FIGURE 26 – Images issues de [157]. (a) Modèle 3D d’un immeuble de trois étages. Les surfaces rouges constituent des plafonds et les bleues représentent les planchers. (b) Graphe de connectivité représentant les pièces (bleues), les couloirs (en vert), les parois et ouvertures.

Thiemann et Sester [143] proposent un partitionnement de modèles de bâtiments basée sur une adaptation de l’algorithme de Ribelles et al. [123]. Les auteurs procèdent à des intersections entre le modèle et les plans à ses frontières pour détecter les différentes caractéristiques qui le constituent. Ces dernières sont ensuite interprétées à l’aide d’un simple arbre de décision basé sur des règles. Un ensemble d’attributs géométriques et topologiques caractérisants est défini pour les composants communs de bâtiments (toiture, façade, portes, cheminée, etc.). La méthode ne traite que des modèles déjà géométriquement et topologiquement bien structurés, et les modèles testés étant plutôt de type SIG, elle ne convient pas pour traiter les détails intérieurs (cf. figure 27).

Plus récemment, Boulch et al. [27] ont introduit une méthode d’étiquetage sémantique directement sur les polygones des modèles CAO de bâtiments, basée sur une approche ascendante. Cette dernière repose sur des attributs de grammaires contraintes avec des prédicats géométriques spécifiques sur les primitives 3D. Les auteurs introduisent aussi des opérateurs maximaux pour réduire l’espace de recherche à analyser lors de l’identification des primitives et testent leur méthodes sur plusieurs modèles pour identifier les murs, les ouvertures, les escaliers, etc. (cf. figure 28). Une des limites de l’approche est sans doute le fait que l’identification sémantique des composantes reste surfacique, une subdivision volumique de la soupe de polygone n’étant pas proposée malgré la disponibilité de détails intérieurs du bâtiment (cf. figure 28c).

D’autres travaux étudient plus amplement la possibilité de faire d’un modèle géométrique pur un modèle BIM [106, 35]. Il est aussi souvent question

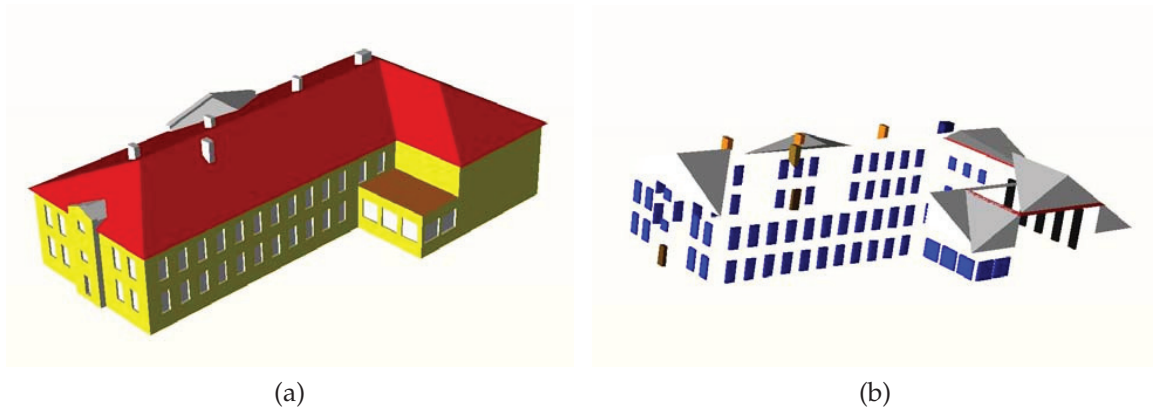


FIGURE 27 – Résultat de l’approche de Thiemann and Sester [143]. (a) Identification des éléments surfaciques sur la façade du modèle (murs et toits). (b) Identification des éléments volumiques (portes, fenêtres, cheminées).

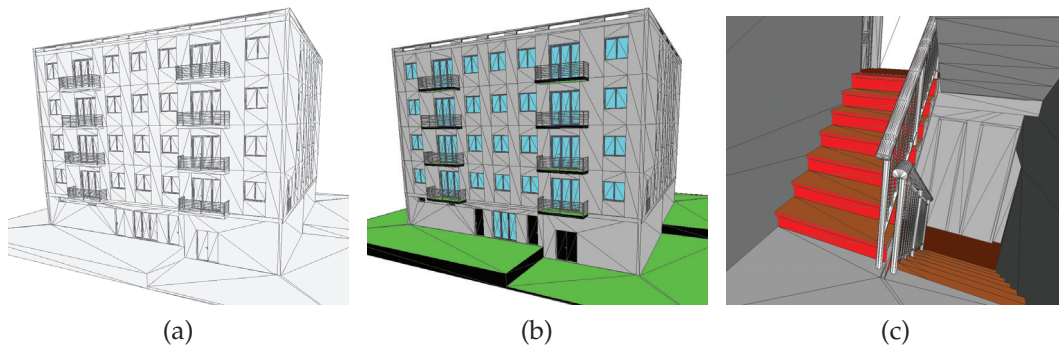


FIGURE 28 – Enrichissement sémantique de modèle CAO 3D par Boulch et al. [27]. (a) Modèle de départ constitué par une soupe de triangle. (b) Identification sémantique des polygones (murs, plancher, portes et fenêtres). (c) Identification sémantique des escaliers.

de l’étude de l’interopérabilité entre les BIM et les SIG, notamment à travers les formats IFC et CityGML [72, 108, 53]. Ainsi dans Nagel et al. [106], les auteurs étudient les conditions conceptuelles pour l’automatisation d’une telle transformation et mettent l’accent sur la nécessité d’enrichir le modèle de base avec de l’information topologique et sémantique. Ils proposent une approche qui consiste d’abord à transformer le modèle géométrique en un modèle de type CityGML, avec principalement une structuration sémantique et éventuellement topologique de la géométrie de départ (cf. figure 29a). Par la suite, dans le cas des modèles surfaciques, il s’agit de faire des composants identifiés des volumes topologiquement fermés pour mieux correspondre à un modèle de type IFC, comme l’illustre la figure 29b.

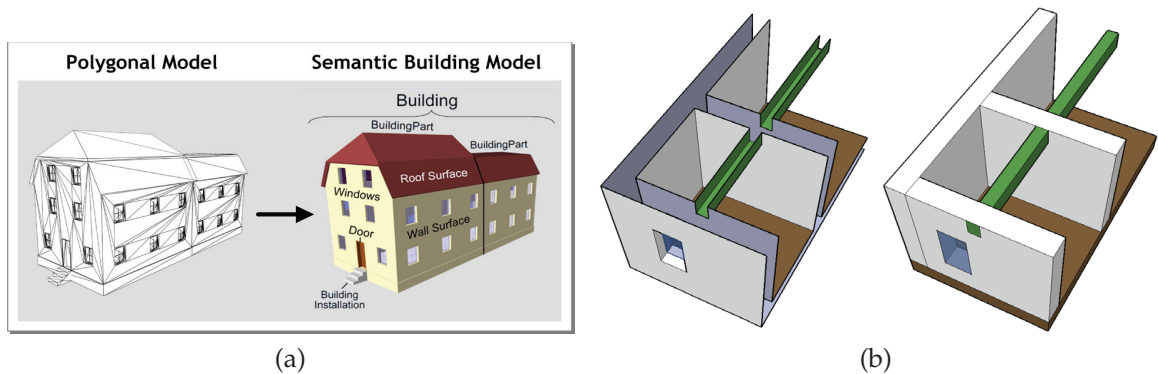


FIGURE 29 – Approche de Nagel et al. [106]. (a) Enrichissement sémantique (droite) d'un modèle CAO polygonal (gauche). (b) Différences structurelles entre un modèle de type CityGML (gauche) et un modèle de type IFC (droite).

2.3.3 Bâtiments possédant des modèles de type BIM

L'exploitation des modèles BIM disponibles constitue aussi une intense piste de recherches ces dernières années, même si cela se limite à des constructions plutôt récentes. La plupart des recherches consistent à étudier l'extraction des données appropriées pour l'analyse des bâtiments à travers des opérations de simulation [127, 14, 74, 11, 78]. La difficulté consiste principalement à piocher les bonnes informations stockées dans les standards et à les adapter convenablement à l'usage des applications ciblées.

Par exemple Van Treeck et al. [149] proposent l'extraction d'un modèle intermédiaire de type B-Rep à partir des informations fournies dans un fichier IFC afin que cela serve de base commune à des opérations de simulation thermique et d'analyse des structures (cf. figure 30). Les auteurs introduisent une décomposition de leur modèle B-Rep en plusieurs partitions volumiques plus adaptées aux besoins des calculs et maintiennent les relations topologiques qui lient ces partitions. Le modèle qui en découle, appelé *Connection Model*, peut par la suite être maillé plus finement pour des calculs d'éléments finis. Cependant, cette approche se repose sur les informations topologiques et sémantiques disponibles dans les fichiers IFC pour identifier les différents composants structurels du bâtiment.

Il est important de noter que pour les méthodes exploitant les données des standards, la dépendance aux informations qui y sont contenues peut constituer une limite dans la mesure où elles ne sont pas toujours présentes dans les fichiers, ou sont souvent mal renseignées [47]. Dans le but de pallier à cela, d'autres pistes de recherche visent à valider les informations spatio-sémantiques [46] ou à apporter des opérations de modifications (mise à jour et suppres-

sion), notamment sur des modèles au format IFC [103]. Il est aussi question de l'enrichissement sémantique des IFC sans compromettre leur interopérabilité, à l'image des travaux présentés par De Farias et al. [48].

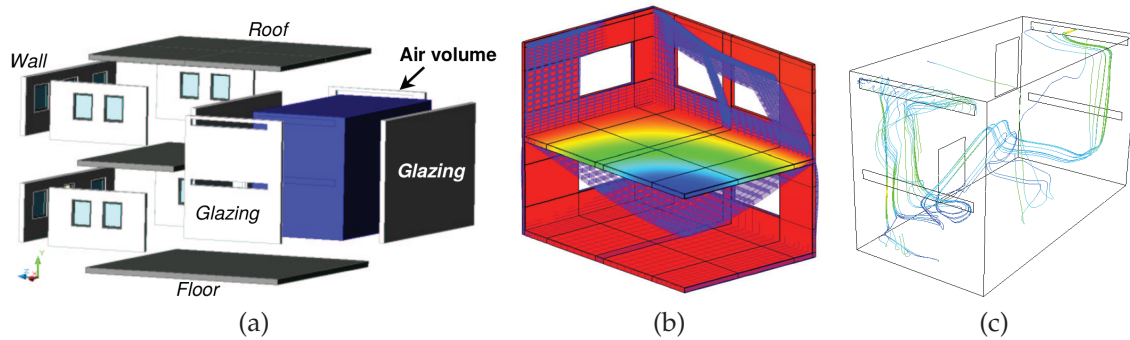


FIGURE 30 – Simulation à partir d'un IFC par Van Treeck et al. [149]. (a) Extraction des différentes composantes à partir du modèle IFC de base. (b) Opération d'analyse de résistance structurelle à des charges verticales. (c) Étude d'un flux turbulent injecté aux ouvertures.

Tout comme pour les données BIM, les modèles SIG sont eux aussi largement exploités pour des opérations de simulation [109, 126, 110] (cf. figure 31). Ils sont également vulnérables à ces problèmes d'informations erronées ou incohérentes. Ces problèmes concernent en particulier la géométrie du fait des méthodes de construction de ces modèles. C'est le cas par exemple dans les fichiers CityGML qui constituent le standard phare du domaine, à l'image des IFC pour les BIM. Pour pallier à cela, un nombre important de chercheurs se sont penchés sur le problème afin d'améliorer les données contenues dans un fichier CityGML [89, 171, 7, 90, 172]. Par conséquent, les méthodes reposant sur ces standards doivent prendre en considération les risques encourus, en attendant des progrès dans le sens des corrections et une meilleure maîtrise de ces standards par les acteurs impliqués dans les travaux de construction.

2.3.4 Discussion

Nous avons pu constater qu'un grand nombre de travaux vise à exploiter les supports numériques existant déjà pour certains bâtiments ou villes, afin d'en tirer des modèles plus détaillés et plus précis que ce que ne peuvent offrir les approches sans support. En effet les modèles qui en découlent sont plus représentatifs des bâtiments tels qu'ils sont structurellement conçus là où les méthodes d'acquisition permettent de les représenter tels qu'ils sont visibles.

Les modèles en question restent principalement fournis en informations géométriques. Cela explique l'engouement des recherches visant à les enrichir, en

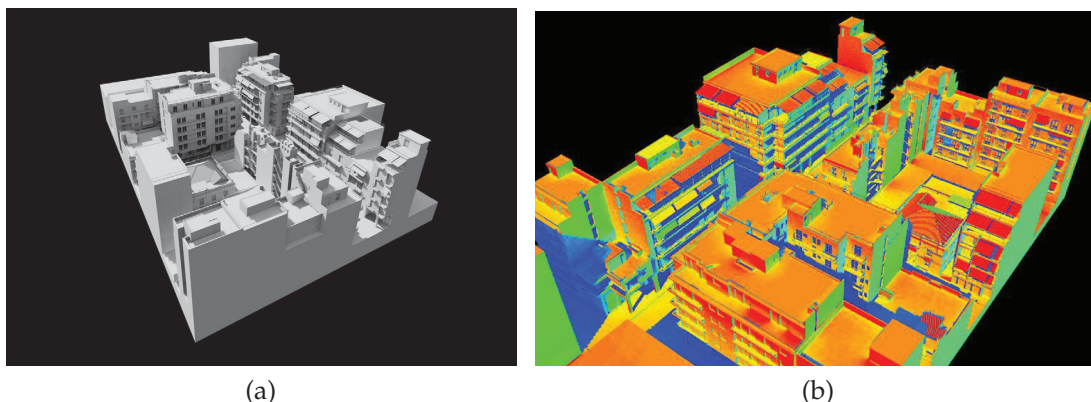


FIGURE 31 – Travaux de Nikiforiadis et Pitts [109]. (a) Modèle de ville virtuelle à grande échelle. (b) Simulation d'éclairage naturel sur le modèle.

leur rajoutant notamment de la topologie et de la sémantique. Cela permet ainsi de se rapprocher des modèles BIM et de s'ouvrir à un plus grand nombre d'applications. Nous avons aussi pu constater que dès lors qu'une certaine partie de ces informations est disponible, il est déjà possible d'exploiter beaucoup d'applications, en particulier dans les domaines de l'analyse du bâtiment (énergie, éclairage, navigation, calcul de structure, etc.).

Cependant, il subsiste encore plusieurs limites, par rapport à l'usage des données numériques disponibles pour les bâtiments. Premièrement, les approches qui les exploitent dépendent logiquement de la qualité des données fournies et peinent souvent à procéder de manière totalement automatique, aussi bien dans l'interprétation des données d'origines que dans l'extraction et la reconstruction d'informations ciblées. Deuxièmement, il n'existe pas encore de procédé officiel de validation des standards permettant de garantir l'intégrité des données qu'ils contiennent. Cela rend difficile l'uniformisation des approches d'enrichissement et expose les applications visées à des incohérences. Enfin, il apparaît clairement que l'usage des standards directement pour les applications d'analyse n'est pas pratique du fait de leur contenance significative d'une part et de la description des données non adaptée à un usage direct d'autre part. Par exemple dans un fichier IFC, la description géométrique peut varier d'un élément à l'autre (B-Rep, CSG, ...). De plus les éléments sont décrits dans des repères locaux et nécessitent donc plusieurs transformations spatiales pour être dans un repère global [149]. Tout ceci rend nécessaire l'usage de structures intermédiaires entre les standards à leur niveau actuel et les applications qui les utilisent. Ces structures doivent être en mesure de rassembler l'essentiel des informations nécessaires aux applications, en plus de garantir leur validité et d'optimiser leur accès. Cela se traduit dans la littérature par l'usage de diverses structures de données sur lesquels les différents travaux s'appuient pour collecter et stocker les informa-

tions reconstruites ou acquises par le biais d'opérations diverses.

Nos travaux rentrent dans le cadre des méthodes exploitant les données de type CAAO et proposant une structure intermédiaire entre les modèles 3D et les applications. Nous proposons la reconstruction topologique et sémantique des composants des bâtiments à partir de leur description géométrique 3D. Contrairement à ce qui a été fait jusque là, notre approche procède de manière totalement automatique, générique et s'applique aussi bien à des modèles de type BIM que de type SIG. Nous faisons usage des cartes combinatoires (n-cartes) [45] qui constituent une structure de données topologique qui s'adapte parfaitement à la représentation des bâtiments. Nous définissons sur la base de cette structure un modèle riche aussi bien en topologie qu'en géométrie et en sémantique puis nous en extrayons les données nécessaires à diverses applications autour de l'architecture. Dans la section suivante, nous nous intéressons donc aux structures de données introduites dans la littérature et nous expliquons le choix des n-cartes ainsi que leurs propriétés.

2.4 LES STRUCTURES DE DONNÉES POUR MODÉLISER DES BÂTIMENTS

Plusieurs structures de données consacrées à la représentation de modèles 3D de bâtiments sont identifiables dans les travaux de ces dernières décennies. Le principal centre d'intérêt de ces structures reste la représentation géométrique, topologique et sémantique des composantes des bâtiments. Mais puisque les standards BIM et SIG sont déjà fortement orientés sur la représentation géométrique et principalement sémantique des éléments, nous nous intéressons aux structures de données intermédiaires prioritairement axées sur la représentation topologique. Notons tout de même que, indépendamment des approches utilisées, il n'y a pas de modèles purement topologiques, sémantiques ou géométriques, mais des modèles hybrides utilisant différents niveaux d'abstraction [52].

2.4.1 *Notions de bases sur les structures de données topologiques*

Il est nécessaire de définir certaines notions qui caractérisent l'ensemble des structures de données topologiques. En effet, elles sont destinées à représenter les relations spatiales entre des objets et les spécificités interviennent principalement dans la représentation de ces objets. Ainsi nous notons deux types d'objets : les variétés et les non-variétés. Ces objets sont représentés par des assemblages de primitives appelées cellules, qui sont liées entre elles par des liens d'adjacence et d'incidence. Par ailleurs, les objets peuvent être orientables ou non orientable, et éventuellement contenir ou non des bords. Nous définissons ici ces différentes notions.

CELLULE

Une cellule en dimension i , appelée i -cellule, peut être intuitivement décrite comme une entité topologique correspondant à un sous espace de \mathbb{R}^i . Un point correspond à une 0-cellule ou sommet. Un segment correspond à une 1-cellule ou arête; une face plane (à l'image d'un papier tellement fin qu'il aurait un volume nul) correspond à une 2-cellule ou face...

RELATIONS D'INCIDENCE ET D'ADJACENCE

L'incidence correspond à la relation d'une cellule donnée à une autre cellule au niveau de leurs frontières. Par exemple, un sommet ou une arête appartenant à la frontière d'une face sont incident à cette face, et réciproquement, la face est incidente à l'arête et au sommet. Par ailleurs, deux cellules sont adjacentes si elles partagent une cellule à leurs frontières. Par exemple, deux faces (resp. deux arêtes) sont adjacentes si elles sont incidentes à la même arête ou point (resp. point). L'ensemble des cellules formant un objet et leurs relations d'incidence et d'adjacence forme un complexe cellulaire.

VARIÉTÉ ET QUASI-VARIÉTÉ

Une variété est un espace topologique qui est localement euclidien, c'est à dire qu'autour de chaque point, il y a un voisinage topologiquement équivalent à une boule unitée ouverte dans \mathbb{R}^n . Par exemple, une 2-variété est une surface dont tout point interne à ses frontières a un voisinage homéomorphe à un disque, et tout point à sa frontière a un voisinage homéomorphe à un demi-disque. Une quasi-variété est l'analogue combinatoire des variétés. Une quasi-variété de dimension n est un assemblage de quasi-variétés de dimension $n - 1$ uniquement le long $n - 1$ -cellules. Par exemple une quasi-variété 2D est obtenue par assemblage de courbes polygonales 1D en réalisant uniquement des identifications d'arête. Il est donc interdit d'identifier les sommets. En dimension 3, une quasi-variété est un ensemble de quasi-variétés 2D assemblées le long de leurs faces. Il faut noter qu'en dimension 2, il y a équivalence entre variété et quasi-variété, mais cela n'est plus vrai en dimension supérieure.

ORIENTABILITÉ D'UN OBJET

Un objet est dit orientable s'il est possible de définir une orientation uniforme pour ses cellules, permettant ainsi de différencier ses côtés. Dans le cas d'un objet fermé, un objet est orientable s'il est possible de différencier son intérieur de son extérieur. Par exemple une sphère est orientable, là où la bouteille de Klein ne l'est pas. Le ruban de Möbius est aussi une autre variété connu pour ne pas être orientable.

BORD

Un bord est l'ensemble des points d'une variété qui ont un voisinage homéomorphe à la demi-boule unitée. Par exemple un disque possède un bord alors

qu'une sphère n'en a pas. Nous définissons ainsi une variété fermée pour une variété qui n'a pas de bord.

2.4.2 Structures de données topologiques utilisées dans la littérature

Une quantité importante de travaux a été consacrée à la topologie dans les deux domaines BIM et SIG, parce que les relations topologiques entre les composants d'un modèle sont essentielles pour la cohérence des données [65] et sont également cruciales pour les processus de simulation [148, 13]. C'est le cas notamment pour les simulations de navigation pour lesquelles beaucoup d'approches sont basées sur les graphes d'adjacence relatant les connexions entre les différentes pièces des bâtiments étudiés [37, 97]. Paul et Bradley [117] proposent l'encodage des bâtiments à l'aide de structures purement mathématiques basées sur leur représentation topologique. Cette dernière se base sur la théorie des graphes avec une décomposition en complexes cellulaires simplifiés des éléments du bâtiment. Similairement, Paul et Borrmann [116] introduisent une approche qui dérive une représentation topologique cellulaire des composants d'un bâtiment à partir de sa description géométrique. Les auteurs utilisent une structure de données de type *Radial-Edge*⁴ [156] combinée à une représentation en *Octree* pour détecter les contacts entre les éléments. Cependant dans ces travaux, il n'y a aucune structure permettant le stockage des relations topologiques entre les éléments de manière explicite. Elles sont donc calculées à la volée à chaque fois qu'elles sont requises.

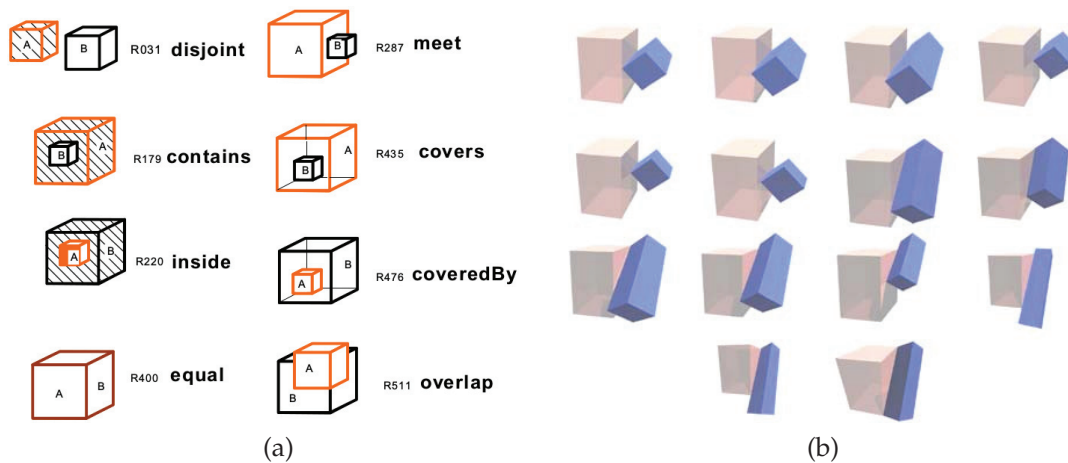


FIGURE 32 – Relations spatiales possibles entre deux objets 3D avec (a) le 9-IM et (b) le DM. Images extraites de [173]

Zlatanova et al [173] présentent dans ce cadre une intéressante étude d'ensemble des modèles 3D topologiques utilisés en modélisation de bâtiment. Les

4. Structure de données permettant la représentation de non-variétés 2D.

auteurs y relèvent notamment le fait que la plupart des modèles offrent une représentation explicite de la géométrie mais pas de la topologie. Ils proposent ensuite plusieurs structures pour compenser cela et représenter les relations spatiales, comme par exemple le *9-intersection Model* (9-IM) [55] ou encore le *Dimensional Model* (DM) [19] (cf. figure 32). Le 9-IM est un modèle topologique qui sert de base à plusieurs standards SIG pour définir des requêtes et des affirmations quant aux relations spatiales entre les objets. Son principe est de comparer, pour deux objets donnés, les intersections entre leurs frontières, leur espaces intérieurs et enfin extérieurs. Cela résulte sur une matrice 3×3 permettant de distinguer $2^9 = 512$ configurations possibles, d'où le nom du modèle. Quant au DM, c'est une structure représentant les objets par des éléments dimensionnels⁵ basés sur l'ordre de leurs points. Les relations spatiales sont décrites en termes de relations dimensionnelles, à savoir les relations qui existent entre les éléments dimensionnels des objets.

À défaut d'avoir une représentation explicite de la topologie, certaines approches se sont spécialisées sur les requêtes topologiques dans les standards BIM et SIG, afin de permettre entre autre la détection des relations spatiales qui lient les composants. Borrmann et Rank [26] introduisent un langage de requêtes spatiales 3D pour les BIM et proposent une définition formelle d'un ensemble d'opérateurs topologiques qui servent de conditions aux requêtes. Les objets dont les interactions topologiques sont testées sont représentés par une structure de type octree et les relations spatiales sont décrites en utilisant le modèle 9-IM. Une extension de l'approche s'adaptant aussi aux modèles de type SIG sera proposée par la suite [25]. Nous retrouvons également le modèle 9-IM dans les travaux de Ellul et Haklay [57], qui proposent une structure B-Rep améliorée permettant d'accélérer les requêtes spatiales entre deux objets dans les modèles SIG 3D. L'intérêt du B-Rep amélioré se confirme au fur et à mesure que la taille des données augmente.

Dans le cadre des modèles représentant la topologie de manière explicite, les structures de données combinatoires apparaissent comme étant très pertinentes pour la modélisation des bâtiments. Ledoux et Gold [88] introduisent l'*Augmented Quad-Edge* (AQE) pour la représentation des variétés 3D dans le cadre des géosciences. Cette structure, qui est une extension des *Quad-Edges*⁶ [66], stocke simultanément les subdivisions primals et duals des objets 3D représentés. Cependant une des limites de l'AEQ est qu'elle permet difficilement de mettre en place des opérations incrémentales de construction. Apporter une solution à ce problème est d'ailleurs la motivation principale de la structure de

5. Portion de l'espace d'une dimension donnée, liée à une autre dimension de référence ; par exemple une ligne (1D) plongée dans \mathbb{R}^3 .

6. Structure de données permettant de représenter des variétés 2D et 3D, orientables ou non. Elle offre également une représentation des graphes primals et duals des objets.

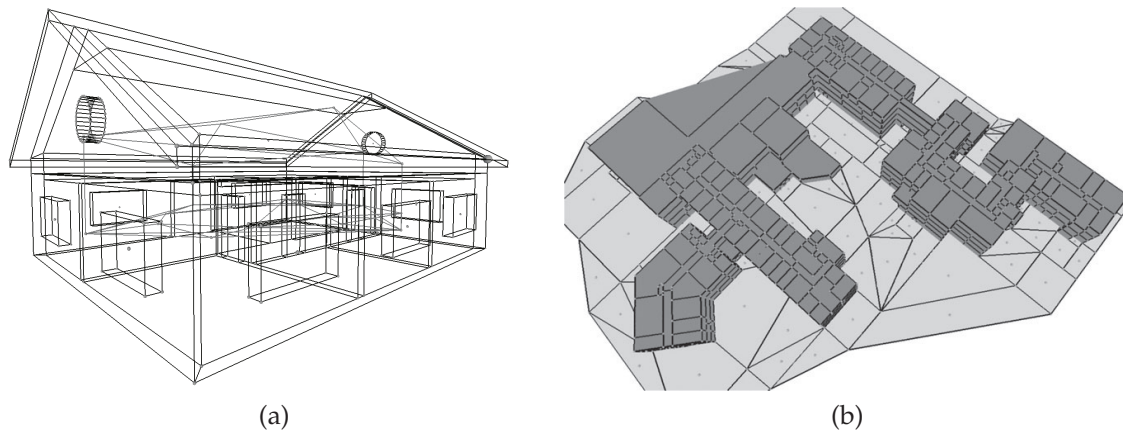


FIGURE 33 – Modèles reconstruits avec les DHE. (a) Une maison décrite dans un fichier CityGML, en évitant les trous et cavités [21]. (b) Un ensemble de bâtiments et le terrain extérieur.

données *Dual Half-Edge* (DHE) proposée par Boguslawski et Gold [20]. Les auteurs introduisent une méthode rapide de construction de bâtiments à travers des complexes cellulaires dont les liens spatiaux sont maintenus. La figure 33 illustre quelques résultats de leurs travaux. Fradin et al. [62] utilisent les cartes généralisées (3-G-cartes) [93] pour produire une représentation topologique de scènes intérieures complexes, visant à l'amélioration des performances lors de la visualisation et de la simulation d'éclairage. Horna et al. [76] font usage des 3-G-cartes pour reconstruire la géométrie et la topologie des bâtiments 3D à partir de plans 2D. Cela leur permet ainsi de garantir la validité de la topologie des faces 2D sur les plans avant de procéder à leur extrusion en 3D. Thomsen et al. [144] soulignent la complexité de la modélisation et de la gestion de la topologie dans les modèles SIG 3D et proposent une approche également basée sur les 3-G-cartes orientés et sur des structures *cell-tuple* [29] pour gérer la topologie de manière plus générique.

2.4.3 Discussion

Les travaux étudiés dans cette section montrent un consensus clair sur l'importance qu'occupent les structures de données topologiques dans la modélisation des bâtiments. En effet, que ce soit en BIM ou en SIG, être en mesure d'étudier les relations spatiales entre les objets est crucial pour bon nombre d'applications d'analyse faisant usage de ce types de données. De ce fait, il en ressort certaines contraintes sur les structures de données se proposant de représenter ces relations topologiques, à savoir l'accessibilité, la maniabilité et la généricité. Le premier point permet de faciliter la reproductibilité des outils développés à partir de la structure, le second point permet la définition d'autant d'opérations

que nécessaire et le dernier simplifie les opérations de modification.

Cependant, le constat est que malgré le nombre important de structures de données disponibles dans la littérature, peu d'entre elles se prêtent à ces critères. C'est d'autant plus vrai que dans des applications touchant à l'architecture, les besoins sont clairement définies alors que beaucoup de structures renferment des aspects inutiles pour ce domaines. À l'opposée de cela, les cartes combinatoires offrent une définition claire, renforcée par des contraintes de cohérences et des opérations de création, modification et de consultation. De plus, le formalisme de cette structure offre une généricité de toutes ces opérations, indépendamment de la dimension des objets représentés. Ce sont les raisons pour lesquelles nous portons notre choix sur elle.

Nous étudions plus en détails les caractéristiques des cartes combinatoires, et nous présentons une brève étude comparative entre elles et les autres structures qui s'intéressent à la modélisation des bâtiments dans les BIM et/ou SIG.

2.5 LES CARTES COMBINATOIRES

Une carte combinatoire de dimension n (ou n -carte) est une structure de données permettant de décrire des quasi-variétés orientables de dimension n , avec ou sans bord. Introduit dans les années 90 [94, 93], elle constitue une structure orientée arête représentant la subdivision spatiale des objets par une décomposition cellulaire. Nous présentons dans cette section quelques définitions et propriétés des n -cartes définissant des notions qui interviennent régulièrement dans ce manuscrit. Nous introduisons également quelques opérations dont nous faisons usage dans notre méthode, et un bref comparatif des n -cartes avec les autres structures de données topologiques citées dans la section précédente. Toutes les notions et définitions présentées ci-après sont extraites de l'ouvrage de Damiand et Lienhardt [45], dans lequel une description complète des n -cartes est fournie.

2.5.1 Définitions de base

Une n -carte est définie par un ensemble d'éléments de base appelés brins, sur lesquels des permutations partielles⁷ et des involutions partielles⁸ agissent en respectant des contraintes.

Définition 1 (n -carte) Une n -carte, avec $n \geq 0$, est un $(n+1)$ -tuple $C = (B, \beta_1, \dots, \beta_n)$, tel que :

7. Une permutation partielle f sur un ensemble D est une bijection de $D \cup \{\emptyset\}$ à $D \cup \{\emptyset\}$ avec $f(\emptyset) = \emptyset$ et tel que $\forall x, y \in D, f(x) = f(y) \neq \emptyset \Rightarrow x = y$.

8. Une involution partielle g sur un ensemble D est une permutation partielle sur D satisfaisant $g(x) \neq \emptyset \Rightarrow g(g(x)) = x$.

1. B est un ensemble fini de brins ;
2. β_1 est une permutation partielle sur B ; β_0 signifie β_1^{-1} ;
3. $\forall i \in \{2, \dots, n\} : \beta_i$ est une involution partielle sur B ;
4. $\forall i \in \{0, \dots, n-2\}, \forall j \in \{3, \dots, n\}$, tel que $i+2 \leq j$, $\beta_i \circ \beta_j$ est une involution partielle.

La quatrième condition de la Définition 1, appelée *contrainte de composition* garantit que les objets représentés par une n -carte sont bien des quasi-variétés. La figure 34 fournit l'illustration d'une représentation en 3-carte de deux cubes adjacents A et B (resp. cyan et or). La vue éclatée de la figure 34b permet d'illustrer les liens spatiaux β_1, β_2 et β_3 entre les cellules. Ainsi, en dehors de β_1 qui est une permutation partielle, pour tout $i \in \{2, \dots, n\}$, β_i est une involution partielle impliquant que $\beta_i = \beta_i^{-1}$. Puisque toutes les relations β sont partielles, les brins de C peuvent être liés à l'ensemble vide \emptyset , ce qui permet aux n -cartes de décrire des objets comportant des bords. Un brin b est dit i -libre s'il est lié à \emptyset par β_i , sinon il est i -cousu avec un brin b' . Ce qui nous mène à la Définition 2.

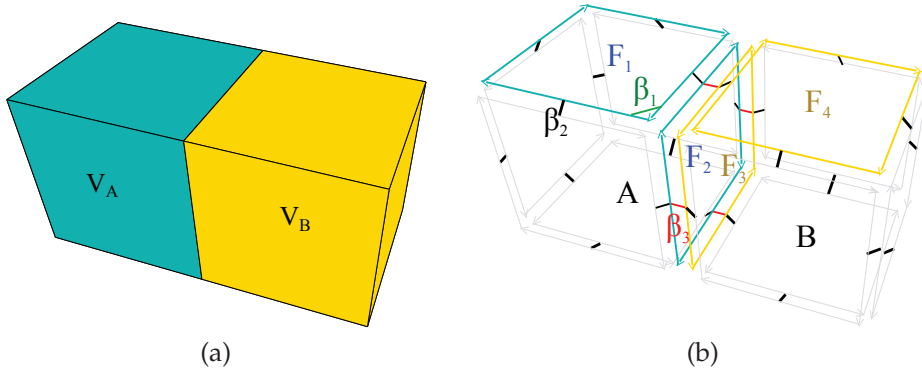


FIGURE 34 – (a) Deux volumes cubiques V_A et V_B topologiquement liés. (b) 3-carte correspondante à V_A et V_B avec toutes leurs relations β_i (vue éclatée).

Définition 2 (i-libre, i-cousu) Soit $C = (B, \beta_1, \dots, \beta_n)$ une n -carte, $b \in B$ et $i \in \{0, \dots, n\}$:

- b est i -libre si $\beta_i(b) = \emptyset$;
- b est i -cousu avec le brin $b_2 \in B$ si $\beta_i(b) = b_2$.

D'une manière générale, il est possible d'avoir des brins i -libres en toute dimension mais en pratique, les objets réels décrits sont souvent dépourvus de bords, à part dans la plus grande dimension. Par exemple dans la figure 34, exception faite des brins de F_2 et F_3 à travers lesquels V_A et V_B sont 3-cousus, tous les autres brins sont 3-libres. En dehors de cela, aucun des deux volumes ne

contient de brin 2-libre ou 1-libre. F_1 et F_2 de A (resp. F_3 et F_4 de B) sont liées par β_2 (traits noirs en gras) au niveau de leur arête commune. V_A et V_B sont liés par β_3 (traits rouges en gras) à travers leur faces confondues $F_2 \in A$ et $F_3 \in B$. Le trait vert en gras représente un lien β_1 entre deux arêtes de F_1 . Par ailleurs, une n -carte peut contenir différentes composantes connexes. L'ensemble des brins appartenant à une même composante connexe qu'un brin donné peut être retrouvé grâce à la Définition 3. Il s'agit de l'ensemble de brins de l'orbite formée par toutes les permutations. Intuitivement, une orbite est constituée par l'ensemble des brins qui peuvent être atteints à partir d'un brin donné en utilisant n'importe quelle suite de permutations.

Définition 3 (composante connexe) Soit $C = (B, \beta_1, \dots, \beta_n)$ une n -carte et $b \in B$. $\langle \beta_1, \dots, \beta_n \rangle(b)$ est la composante connexe contenant b .

En liant les brins entre eux grâce aux relations β_i , nous obtenons des orbites formant les cellules qui composent une n -carte, conformément à la Définition 4.

Définition 4 (i-cellule) Soit $C = (B, \beta_1, \dots, \beta_n)$ une n -carte, $b \in B$ et $i \in \{0, \dots, n\}$. La cellule de dimension i ou i -cellule contenant b est i -cell(b) :

- si $i = 0$, 0 -cell(b) = $\langle \{\beta_j \circ \beta_k \mid \forall j, k \in \{1, \dots, n\}, j < k\} \rangle(b)$;
- sinon, i -cell(b) = $\langle \beta_1, \dots, \beta_{i-1}, \beta_{i+1}, \dots, \beta_n \rangle(b)$.

La décomposition cellulaire d'un objet nD est alors composée de cellules $0D$ jusqu'à nD . Puisque nous travaillons avec des objets $3D$, nous utilisons dans nos travaux une 3-carte, comportant des 0-cellules (sommets), des 1-cellules (arêtes), des 2-cellules (faces) et des 3-cellules (volumes) pour décrire les composants des bâtiments. Une n -carte décrit de manière explicite les relations d'incidence et d'adjacence qui lient les différentes i -cellules qui la composent.

Définition 5 (incidence et adjacence) Soit $C = (B, \beta_1, \dots, \beta_n)$ une n -carte, $b, b' \in B$ et $i, j \in \{0, \dots, n\}, i \neq j$:

- les cellules i -cell(b) et j -cell(b') sont incidentes ssi i -cell(b) \cap j -cell(b') $\neq \emptyset$;
- les cellules i -cell(b) et i -cell(b') sont adjacentes ssi elles sont incidentes à une même $(i - 1)$ -cellule.

Plusieurs opérations permettent de procéder à des modifications d'une n -carte. Nous détaillons dans la sous section suivante quelques unes de ces opérations et les différentes conditions qui les régissent.

2.5.2 Opération de i-couture

Une première opération de base dans une n -carte consiste à créer les relations β_i entre les différents brins qui la composent avec les opérations de i -couture. Ces dernières permettent de lier uniquement les brins i -libres par β_i . Afin de satisfaire la contrainte de composition (i.e. $\beta_i \circ \beta_j$ est une involution partielle pour $|i - j| \geq 2$), il est souvent nécessaire de lier plus de deux brins. Par exemple si deux brins sont liés par β_3 dans une 3-carte, il est également nécessaire de lier tous les brins appartenant aux deux 2-cellules contenant ces deux brins.

Une opération de i -couture va entraîner des identifications de cellules. Par exemple lorsque deux brins sont cousus par β_2 dans une 2-carte, les deux 1-cellules correspondantes sont identifiées comme étant une seule et même arête. Cela peut impliquer l'identification des sommets incidents aux arêtes initiales. Pour cette raison, il n'est pas possible d'appliquer une opération de i -couture à n'importe quel ensemble de brins : les cellules identifiées doivent avoir la même structure, c'est à dire qu'elles doivent être isomorphes les unes des autres. En effet, quand deux cellules ont des structures différentes il nous est impossible de les identifier. Donc avant de procéder à une opération de i -couture il est nécessaire de tester si cette opération est possible. La Définition 6 permet de définir les conditions définissant la possibilité de i -coudre deux i -cellule.

Définition 6 (possibilité de i -couture) Soit $C = (B, \beta_1, \dots, \beta_n)$ une n -carte, $i \in \{1, \dots, n\}$, $b, b' \in B$. Soit une orbite en b $o_b = \langle \beta_1, \dots, \beta_{i-2}, \beta_{i+2}, \dots, \beta_n \rangle(b)$, et une orbite en b' $o_{b'} = \langle \beta_1, \dots, \beta_{i-2}, \beta_{i+2}, \dots, \beta_n \rangle(b')$. Il est possible de i -coudre b avec b' si $\beta_i(b) = \emptyset$, $\beta_i^{-1}(b') = \emptyset$ et un isomorphisme⁹ f existe entre o_b et l'inverse de $o_{b'}$, tel que $f(b) = b'$. De plus, si $o_b = o_{b'}$ alors $f = f^{-1}$.

En d'autres termes, pour que deux i -cellules puissent être i -cousues en deux brins b et b' , il faudrait qu'elles soient d'abord i -libres en b et b' et que $(i-1)$ -cell(b) et $(i-1)$ -cell(b') soient géométriquement et topologiquement identiques. La considération de l'intégralité des orbites o_b et $o_{b'}$ est requise pour satisfaire la contrainte de composition à l'issue de l'opération de i -couture. En effet cette dernière va lier tous les brins de o_b avec ceux de $o_{b'}$, ce qui implique que tous ces brins doivent être i -libres. Grâce à la Définition 6, nous pouvons définir convenablement les conditions d'une opération de i -couture avec la Définition 7.

Définition 7 (i -couture) Soit $C = (B, \beta_1, \dots, \beta_n)$ une n -carte, $n > 0$, $i \in \{2, \dots, n\}$ et $b, b' \in B$ tel que b et b' peuvent être i -cousu par l'isomorphisme f de la Définition 6. La n -carte obtenue à partir de C par la i -couture de b et b' est $C_{i\text{-couture}}(b, b') = (B, \beta_1, \beta_{i-1}, \beta'_i, \beta_{i+1}, \dots, \beta_n)$, avec β'_i défini par :

$\forall e \in B,$

9. f est un isomorphisme entre o_b et l'inverse de $o_{b'}$ ssi $\forall e \in o_b, \forall j \in \{1, \dots, i-2, i+2, \dots, n\}, f(\beta_j(e)) = \beta_j^{-1}(f(e))$.

- si $e \in o_b$, $\beta'_i(e) = f(e)$;
- si $o_b \neq o_{b'}$ et $e \in o_{b'}$, $\beta'_i(e) = f^{-1}(e)$;
- sinon $\beta'_i(e) = \beta_i(e)$;

Ainsi, à partir d'une n -carte et de deux de ses brins ayant la possibilité d'être i -cousus, l'opération de i -couture consiste simplement à lier tous les brins dans o_b avec leurs brins "équivalents" dans $o_{b'}$. Plus précisément, β'_i est directement donné par β_i et par l'isomorphisme f . La i -couture de b et b' produit donc la même n -carte que la i -couture de n'importe quel brin b'' de o_b et son brin correspondant $f(b'')$ de $o_{b'}$.

2.5.3 Opération de i -suppression

Le principe de l'opération de i -suppression consiste à retirer une i -cellule donnée d'une n -carte C tout en fusionnant les deux $(i+1)$ -cellules qui lui sont incidentes, lorsqu'elles existent. Sur un objet nD donné, l'opération de i -suppression est définie pour $i \in \{0, \dots, n-1\}$. En effet, pour $i = n$, il n'y a pas de $(i+1)$ -cellule incidente. Dans le cas où une seule $(i+1)$ -cellule est incidente à la i -cellule retirée, aucune fusion n'est opérée. Dans le cas où il y a plus de deux $(i+1)$ -cellules incidentes, il n'est pas possible de retirer la i -cellule, la fusion étant impossible. Par exemple une 0-cellule ayant trois 1-cellules incidentes n'est pas supprimable, car si deux des 1-cellules sont fusionnées, la dernière sera isolée, créant une rupture dans la n -carte. Cette dernière propriété permet ainsi de définir la possibilité de suppression d'une i -cellule, à travers la Définition 8.

Définition 8 (possibilité de i -suppression) *Il est possible de supprimer une i -cellule c dans une n -carte $C = (B, \beta_1, \dots, \beta_n)$ si :*

- $i = n - 1$;
- ou $0 \leq i < n - 1$, et $\forall b \in c$, $\beta_{i+1} \circ \beta_{i+2}(b) = \beta_{i+2} \circ \beta_{i+1}^{-1}(b)$.

Du fait de la définition d'une quasi-variété, à savoir qu'en dimension n au plus deux n -cellules sont incidentes à une $(n-1)$ -cellule, une $(n-1)$ -cellule est par conséquent toujours supprimable dans C . Par ailleurs, lorsque $0 \leq i < n-1$, la condition $\forall b \in c$, $\beta_{i+1} \circ \beta_{i+2}(b) = \beta_{i+2} \circ \beta_{i+1}^{-1}(b)$ assure qu'au plus deux $(i+1)$ -cellules c_1 , incidente à un brin donnée b de c , et c_2 , incidente à $\beta_{i+1}^{-1}(b)$, sont incidentes à c (avec possiblement $c_1 = c_2$).

L'opération de i -suppression, pour $i \geq 1$ est définie par la Définition 9. Lorsqu'une i -cellule supprimable c est retirée de C , la n -carte subit les modifications suivantes. Soit B_S l'ensemble de brins liés par β_i^{-1} à la i -cellule retirée, avec $i \geq 1$, les liens β_i sont modifiés pour tous les brins de B_S . β_i^{-1} est utilisé afin de

prendre correctement en compte le cas de $i = 1$, autrement dit, $\forall b \in c$ un brin à retirer lors d'une i -suppression, les relations spatiales de $\beta_i^{-1}(b)$ doivent être modifiées. Pour tout brin $b_S \in B_S$, le chemin de brins $(\beta_i \circ \beta_{i+1})^k \circ \beta_i(b)$ est suivi, soit jusqu'à ce qu'un brin dans B_S constituant la seconde extrémité du chemin soit atteint, soit jusqu'à obtenir \emptyset lorsque la n -carte a des bords. Par exemple pour $i = 1$, nous supprimons une arête. Nous devons sauter k fois tous les brins de l'arête en passant de face en face, soit jusqu'à trouver un brin n'appartenant pas à l'arête supprimée, soit jusqu'à tomber sur un bord. Ces deux cas correspondent à la même condition : k est le plus petit entier positif tel que les brins du chemin n'appartiennent pas à la i -cellule retirée. Cependant, dans la plupart des cas, $k = 1$.

Définition 9 (i-suppression) Soit $C = (B, \beta_1, \dots, \beta_n)$ une n -carte et c une i -cellule qu'il est possible de supprimer, avec $i \geq 1$. Soit $B_S = \beta_i^{-1}(c) \setminus c$. La n -carte résultante de la i -suppression de c dans C est $C_{S_i}(c) = (B', \beta'_1, \dots, \beta'_n)$, définie par :

- $B' = B \setminus c$;
- $\forall j \in \{1, \dots, n\}, j \neq i, \beta'_j = \beta_j|_{B'}$;
- $\forall b \in B' \setminus B_S, \beta'_i(b) = \beta_i(b)$;
- $\forall b \in B_S, \beta'_i(b) = (\beta_i \circ \beta_{i+1})^k \circ \beta_i(b)$, k étant le plus petit entier positif tel que $(\beta_i \circ \beta_{i+1})^k \circ \beta_i(b) \notin c$.

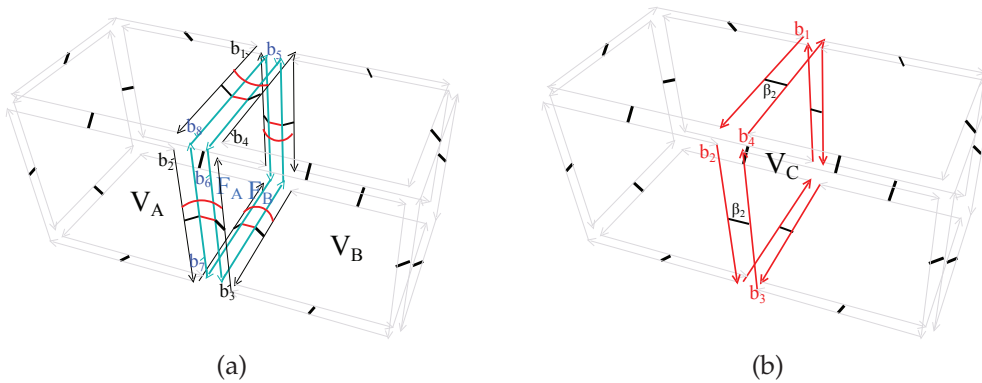


FIGURE 35 – Opérations de 2-suppression sur une 3-carte. (a) Suppression de la 2-cellule F_A liant les volumes V_A et V_B par β_3 . (b) Fusion de V_A et V_B en un volume C .

Dans la figure 35a, il est question de la suppression de la 2-cellule F_A . V_A et V_B sont 3-cousus tel que, entre autres, $\beta_3(b_5) = b_8$ et $\beta_3(b_6) = b_7$ (et réciproquement). Par ailleurs, F_A et F_B sont 2-cousues à d'autres 2-cellules de leurs volumes respectifs tel que, entre autres, $\beta_2(b_2) = b_7$, $\beta_2(b_3) = b_6$, $\beta_2(b_1) = b_8$ et $\beta_2(b_4) = b_5$. Ainsi, lorsque nous procédons à la suppression de F_A , tous les brins de la face, dont b_5, b_6, b_7 et b_8 vont être retirés de la 3-carte. Mais avant

cela, les relations topologiques des brins auxquels ils étaient liés dans V_A et V_B sont modifiées pour prendre en compte le changement. Prenons l'exemple de b_1 qui était initialement lié à b_8 par β_2 . Puisque nous effectuons une 2-suppression, le nouveau brin avec lequel b_1 va être 2-cousu est trouvé en suivant le chemin $(\beta_2 \circ \beta_3)^k \circ \beta_2(b_1)$. Ainsi pour $k = 1$, $\beta_2(\beta_3(\beta_2(b_1))) = b_4$, avec b_4 ne faisant pas partie des brins à retirer. Par conséquent, la face de V_A contenant b_1 et celle de V_B contenant b_4 sont 2-cousues tel que $\beta_2(b_1) = b_4$ et inversement. En appliquant cela à tous les brins concernés, nous obtenons un ensemble de 2-coutures des faces de V_A aux faces de V_B via leurs arêtes qui étaient liées à celles de F_A . Ce qui résulte, après la suppression de tous les brins de ces dernières, en la fusion des deux volumes et l'obtention de V_C (cf. figure 35b).

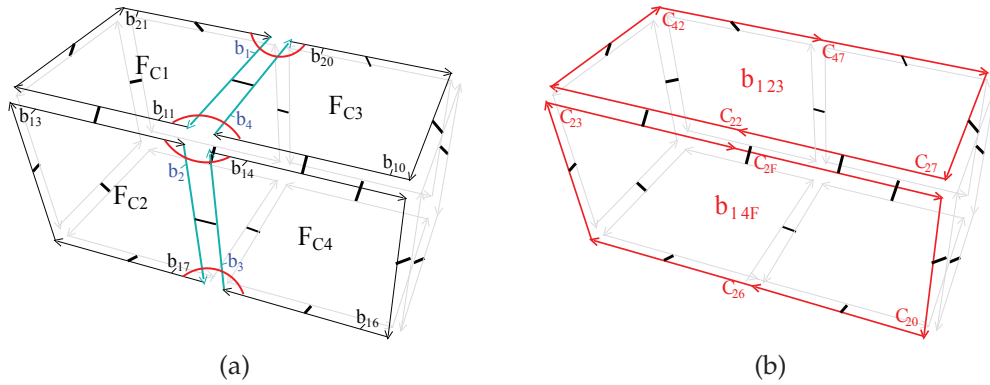


FIGURE 36 – Opérations de 1-suppression sur une 3-carte. (a) Suppression des 1-cellules partagées 1-cell(b_1) et 1-cell(b_2). (b) Fusion de F_{C1} et F_{C3} résultant sur F_{C13} , et de F_{C2} et F_{C4} résultant sur F_{C24} .

La figure 36 illustre l'opération de suppression d'arête. Les deux 1-cellules 1-cell(b_1) et 1-cell(b_2) vont être supprimées. Si nous nous intéressons une fois de plus au cas de $b_1 \in F_{C1}$, il est 1-lié à b_{21} et $b_{11} \in F_{C1}$ tel que $\beta_1(b_{21}) = b_1$ et $\beta_1(b_1) = b_{11}$. Par conséquent sa suppression modifie les relations topologiques de b_{21} et b_{11} . Puisqu'il s'agit ici d'opérations de 1-suppression, seul $\beta_1^{-1}(b_1) = b_{21}$ est modifié. Ainsi, le chemin $\beta_1(\beta_2(\beta_1(b_{21})))$ mène à $b_{20} \in F_{C3}$. b_{21} se voit alors 1-cousu à b_{20} . Par ailleurs dans le cas de $b_4 \in F_{C3}$, les liens de $\beta_1^{-1}(b_4) = b_{10}$ sont mis à jour et il en résulte une 1-couture entre b_{10} et b_{11} . Ce qui permet de fusionner F_{C1} et F_{C3} pour obtenir F_{C13} (cf. figure 36b). La même procédure s'applique aux brins liés à b_2 et b_3 pour obtenir F_{C24} .

L'opération de i -suppression pour $i = 0$ constitue un cas particulier, car tous les liens β_j doivent être modifiés, avec $j = \{1, \dots, n\}$ (cf. Définition 10). Cela est dû au fait que les brins d'une 0-cellule sont liés à d'autres brins par β_j , là où pour $i > 0$, les brins d'une i -cellule sont toujours liés à d'autres brins par β_i . Par conséquent, les modifications des liens β_j sont opérées différemment. Pour

tout brin $b_S \in B_S$, β_j est modifié en suivant le chemin $\beta_j \circ (\beta_1)^k$. En d'autres termes, β_1 est d'abord appliqué autant de fois que nécessaire pour atteindre un brin $b \notin B_S$, puis β_j est appliqué.

Définition 10 (0-suppression) Soit $C = (B, \beta_1, \dots, \beta_n)$ une n -carte et c une 0-cellule qu'il est possible de supprimer. La n -carte résultante de la 0-suppression de c dans C est $C_{S_0}(c) = (B', \beta'_1, \dots, \beta'_n)$, définie par :

- $B' = B \setminus c$;
- $\forall j \in \{1, \dots, n\}, \forall b \in B'$:
 - si $d \notin \beta_j^{-1}(c) \setminus c$, $\beta'_j(b) = \beta_j(b)$;
 - sinon $\beta'_j(b) = \beta_j \circ (\beta_1)^k(b)$, k étant le plus petit entier positif tel que $\beta_j \circ (\beta_1)^k(b) \notin c$.

Un exemple de l'opération de 0-suppression est présentée dans la figure 37 et concerne $c = 0\text{-cell}(b_{11})$. Pour $j = 1$, l'ensemble B_S des brins liés à c est tel que $B_S = \{b_{10}, b_{13}\}$. Ainsi, en appliquant $\beta_j \circ (\beta_1)^k$ pour $k = 1$, nous obtenons $\beta_1(\beta_1(b_{10})) = b_{12}$ et $\beta_1(\beta_1(b_{13})) = b_{15}$. Pour $j = 2$, $B_S = \{b_{10}, b_{13}\}$. Nous avons alors $\beta_2(\beta_1(b_{10})) = b_{12}$, toujours pour $k = 1$. Il en résulte la fusion des arêtes A_1 et A_2 en une seule arête A'_{12} (cf. figure 37b).

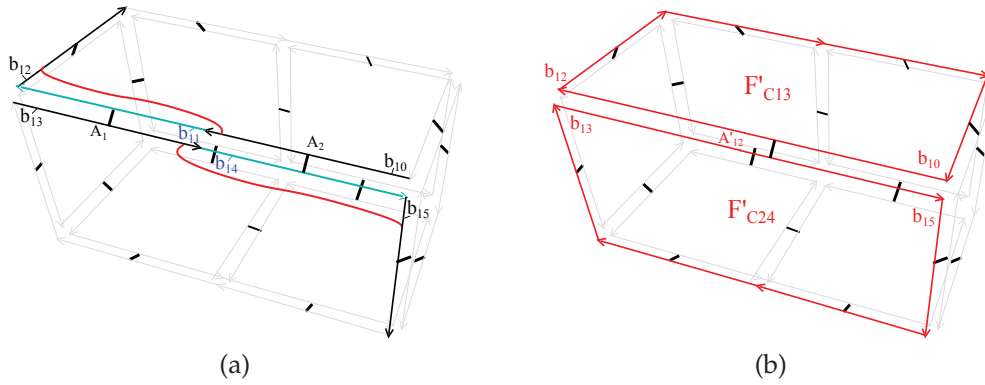


FIGURE 37 – Opérations de 0-suppression sur une 3-carte. (a) Suppression de $0\text{-cell}(b_{11})$. (b) Fusions des arêtes A_1 et A_2 formant la nouvelle arête A'_{12} .

2.5.4 Opération de i -insertion

L'opération d'insertion est l'inverse de l'opération de suppression. elle consiste à rajouter une nouvelle i -cellule à une $(i + 1)$ -cellule existante, en coupant éventuellement cette dernière en deux. L'opération générale d'insertion nécessite trois paramètres en entrée :

- une n -carte C dans laquelle une i -cellule va être insérée ;
- une n -carte C' décrivant la i -cellule à insérer ;
- γ , la fonction décrivant la manière par laquelle la i -cellule est insérée. Plus précisément γ est une bijection entre un sous-ensemble BV' des brins de C' et un sous-ensemble BV des brins de C .

L'insertion est opérée si C' est insérable dans C en fonction de γ . Cette possibilité d'insétion est régie par les quatre conditions suivante :

- C' contient exactement une i -cellule supprimable ;
- les brins de BV' sont i -libres dans C' puisqu'ils vont être i -liés avec les brins de BV ;
- γ commute avec l'involution partielle β_j dans C et C' pour tout brin dans $BV \cup BV'$, pour tout j tel que $|i - j| \geq 2$. Cette condition assure que le β_j résultant est une involution partielle dans la n -carte finale ;
- les chemins de brins suivis lorsque C' est supprimée de la n -carte finale mènent aux brins liés par β_i de la n -carte initiale.

La première et la dernière condition sont requises pour garantir la réversibilité des opérations d'insertion et de suppression. La n -carte résultante de l'opération d' i -insertion de C' dans C est $C_{I_i}(C', \gamma)$ tel que son ensemble de brins $B_{I_i} = BV \cup BV'$. Les involutions partielles C_{I_i} sont définies en fonctions de celles de C (quand deux brins de C sont concernés), celles de C' (quand deux brins de C' sont concernés) ou en fonction de γ (quand un brin de C et un brin de C' sont concernés).

En guise d'illustration, deux 2-cartes C et C' sont représentées dans la figure 38a. C' décrit une arête qui est insérée dans une face de C , produisant ainsi la 2-carte $C_{I_1}(C', \gamma)$ représentée dans la figure 38b. La bijection γ décrit la manière par laquelle C' est insérée dans la face de C : $\gamma(a) = b_6$ et $\gamma(b) = b_3$.

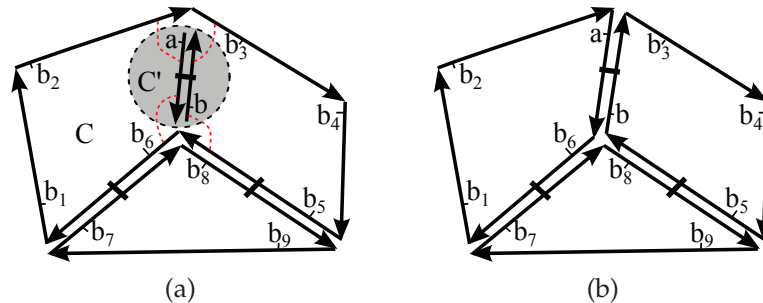


FIGURE 38 – Opération de 1-insertion sur une 2-carte. (a) Deux 2-cartes C et C' , liées par la bijection γ (pointillés rouges). (b) Nouvelle 2-carte obtenue $C_{I_1}(C', \gamma)$.

2.5.5 *Attributs et LCC*

Les cartes combinatoires ne décrivent que les cellules d'une subdivision, et toutes les relations d'incidence et d'adjacence qui lient ces cellules. Cela ne suffit pas pour de nombreuses applications qui ont besoin d'associer des informations aux cellules. Cela peut être des informations géométriques ou non, tels que des coordonnées de points 3D associés à un sommet, une longueur de segment associée à une arête, une couleur ou un vecteur normal associé à une face, etc.

Pour répondre à ce besoin, une carte combinatoire permet de créer des attributs qui sont capables de stocker des informations, et d'associer ces attributs aux cellules de la n -carte. Nous notons i -attributs les attributs associés aux i -cellules. Les attributs peuvent exister pour seulement quelques unes des dimensions, et s'ils existent pour une dimension i , ils ne sont pas nécessairement associés à toutes les i -cellules. Plus précisément, les i -attributs sont associés aux i -cellules par une injection :

- deux i -cellules différentes sont associées à deux i -attributs différents ;
- une i -cellule peut être associée à aucun i -attribut.

Puisque les i -cellules ne sont pas explicitement représentés dans les cartes combinatoires, l'association entre les i -cellules et les i -attributs est transférée aux brins : si l'attribut a est associé à une i -cellule c , tous les brins appartenant à c sont associés à a .

La possibilité d'associer des attributs aux i -cellule nous mène à la définition d'un complexe cellulaire linéaire (LCC) [44]. Un LCC nD permet de représenter un objet nD orientable subdivisé, ayant une géométrie linéaire : chaque sommet de la subdivision est associé à un point. La géométrie de chaque 1-cellule est un segment dont les extrémités sont les points associés aux deux sommets de l'arête, la géométrie de chaque 2-cellule est obtenue à partir de tous les segments associés à la frontière décrivant les limites de la face et ainsi de suite. Cette capacité des n -cartes à stocker des attributs devient de plus en plus intéressante au fur et à mesure que nous enrichissons les modèles de bâtiment avec de nouvelles informations (sémantiques, propriétés des composants, etc).

2.5.6 *Pourquoi utiliser des 3-cartes dans nos travaux ?*

Toutes les structures de données précédemment citées présentent des avantages et des inconvénients. Malgré tout, les structures de données combinatoires sont globalement équivalentes dans leurs principales caractéristiques. Leurs différences concernent essentiellement les types d'objets qu'elles sont capables de représenter. Ainsi, le AQE et les 3-G-cartes sont capables de représenter des va-

riétés orientables ou non et présentant des bords. De leur côté, le DHE et les 3-cartes permettent de représenter uniquement des variétés orientables, mais aussi des non-variétés orientables pour le DHE. Le AQE et le DHE sont similaires dans la mesure où les deux structures de données stockent les représentations primales et duales des objets subdivisés. Quant aux 3-G-cartes et 3-cartes, elles stockent une seule représentation tout en offrant des opérations efficaces pour l'extraction d'une représentation secondaire. Cependant, les 3-cartes nécessitent deux fois moins d'espace mémoire que les 3-G-cartes. Par ailleurs les deux structures offrent une genericité de leurs propriétés et opérations en toutes dimensions, ce qui s'avère être un atout de taille face à toutes les autres structures de données, dans le cadre d'applications nécessitant plus de trois dimensions. Enfin, aussi bien le AQE, que le DHE, les 3-G-cartes et les 3-cartes offrent la possibilité de naviguer à travers toutes les cellules du complexe cellulaire qu'ils forment, ainsi que l'association d'attributs à ces cellules.

Dans la réalité, les objets que nous manipulons sont tous des variétés 3D. Plus précisément, un bâtiment est entièrement constitué de composants qui sont des variétés 3D orientables. De ce fait, il n'est pas nécessaire d'utiliser de structures de données permettant de représenter ce qui sort de ce cadre. Par ailleurs, l'importance d'être en mesure de traiter les représentations de manière uniforme quelle que soit la dimension, comme précisé dans [144] ne laisse d'autre option que le choix des 3-cartes parmi toutes les autres structures de données. Nous utilisons ainsi des 3-cartes tout au long de nos travaux, pour procéder aux traitements de nos modèles 3D. Un autre avantage encore est la disponibilité d'une implémentation des n -cartes et leurs opérations en libre accès dans la bibliothèque informatique Computational Geometry Algorithms Library (CGAL) [43].

RECONSTRUCTION TOPOLOGIQUE DE BÂTIMENTS 3D

C'est tout au bout de la vieille corde que l'on tisse la nouvelle.

— Proverbe Africain

Sommaire

3.1	Vision Globale de l'Algorithme de Reconstruction	52
3.1.1	Préconditions sur les Données de Départ	52
3.1.2	Données d'Entrée et de Sortie Pour Chaque Étape	53
3.2	Chargement de la géométrie dans l'EBM-LCC	55
3.3	Prétraitements	56
3.3.1	Fusion des 0-cellules proches	57
3.3.2	Suppression des 2-cellules dégénérées	58
3.3.3	Correction des 2-cellules non simples	61
3.3.4	Suppression des clones	65
3.3.5	Fusion des 2-cellules coplanaires	65
3.4	Méthode de Reconstruction Classique	69
3.4.1	Reconstruction des liens entre les 2-cellules	69
3.4.2	Reconstitution des liens entre les 3-cellules	76
3.5	Méthode de Reconstruction Avancée	89
3.5.1	Faces manquantes ou en trop et problèmes d'orientation	89
3.5.2	Principe Général du Smart Spatial Subdivision Reconstruction (3SR)	92
3.5.3	Reconstruction des Liens entre les 2-cellules	94
3.5.4	Reconstruction des Liens entre les 3-cellules	97
3.6	Problèmes de précision	99

Grâce au chapitre précédent nous avons pu voir, de manière plus large, ce qui a déjà été réalisé dans le domaine de l'enrichissement de modèles numériques de bâtiments. Cela nous a permis de clairement identifier les besoins qui n'ont pas encore été comblés et de positionner au mieux notre approche. En effet, la méthode que nous proposons s'intègre dans le cadre des approches qui exploitent des modèles 3D de bâtiments de type CAAO. Nous avançons un argument confirmé qui stipule que le seul type d'information que nous sommes sûr de retrouver dans un modèle 3D est la géométrie de l'objet décrit. Partant de ce principe, nous proposons dans un premier temps de construire l'information topologique qui est implicitement décrite par la géométrie. Cette précieuse information topologique, renforcée de la géométrie déjà présente permet par la suite d'enrichir encore plus le modèle, en y rajoutant de l'information sémantique.

Un bâtiment peut être considéré comme étant une subdivision de l'espace qu'il occupe en plusieurs volumes. Ces derniers correspondent aux différents composants de l'édifice (les pièces par exemple), qui sont eux mêmes délimités par des éléments structuraux de types murs, planchers, toits, etc. Ces composants peuvent à leur tour être décrits comme des objets volumiques dans l'espace. Une pareille description correspond parfaitement au formalisme proposé par les 3-cartes. Une vision globale de notre approche permet d'identifier trois phases majeures. À partir d'un modèle 3D contenant la description géométrique d'un bâtiment, nous procédons :

- à des opérations de prétraitement visant à corriger des erreurs connues dans les données d'entrée ;
- à la reconstruction de l'information topologique à l'aide des 3-cartes, en se basant sur la géométrie disponible ;
- puis à la sémantisation automatique des éléments structuraux de base du bâtiment, en s'aidant toujours de la géométrie mais surtout de la topologie nouvellement recouvrée.

La force de cette approche réside principalement dans sa généralité, autant en entrée qu'en sortie. En effet, comme notre approche ne nécessite que de l'information géométrique en début de processus, elle présente l'avantage de s'ouvrir à tout type de format, à partir du moment où une description géométrique explicite peut être extraite de celui-ci. Nous nous sommes donc intéressés à plusieurs types de modèles, parmi les formats spécialisés dans la description de bâtiments.

À partir de ces données brutes, l'objectif est de reconstruire une subdivision volumique de l'espace permettant de reconstituer les différents composants structurels du bâtiment. Pour que cela puisse être fait convenablement, il y a un certain niveau de propreté requis sur les données traitées. Le modèle ne doit pas présenter de données parasites, sources de mauvaises interprétations des éléments de structure du bâtiment et donc logiquement des liens topologiques qui

les lient. Malheureusement, la pratique démontre qu'il est quasiment impossible de trouver un modèle sans problème, si ce dernier ne passe pas au préalable par une phase de nettoyage. Nous précédonc donc notre méthode de reconstruction topologique par une phase de prétraitement des données brutes, afin de mettre ces dernières dans les meilleures conditions et de pouvoir espérer en tirer des résultats convenables.

Après les prétraitements, nous procédons à la reconstruction topologique proprement dite, pour retrouver la topologie implicitement présente dans le modèle nettoyé. Il s'agit dans un premier temps de décrire les entités géométriques de ce dernier à l'aide des cellules d'un LCC 3D. Les sommets correspondent ainsi aux 0-cellules, les arêtes aux 1-cellules, les faces aux 2-cellules et enfin les volumes aux 3-cellules. Dans un souci de clarté, nous introduisons le terme *Enriched Building Model - LCC* (EBM-LCC) qui sera utilisé tout au long du document pour faire référence à nos modèles LCC spécialement dédiés à la description de bâtiments.

Trois étapes principales composent la méthode de reconstruction : (1) la reconstruction des liens β_1 entre les 1-cellules pour former les faces ; (2) la reconstruction des liens β_2 entre les 2-cellules pour former les volumes ; et (3) la reconstruction des liens β_3 entre les 3-cellules pour que l'EBM-LCC ne forme qu'une unique composante connexe. Nous arrivons ainsi à un modèle EBM-LCC unifié et intégralement connecté, dans lequel il est possible d'atteindre une cellule donnée à partir de n'importe quelle autre cellule grâce aux propriétés des 3-cartes. Soit $C = (B, \beta_1, \beta_2, \beta_3)$, un EBM-LCC 3D avec B , l'ensemble des brins constituant la 3-carte, β_1 une permutation partielle sur B et enfin β_2 et β_3 des involutions partielles sur B . Dans les sections à venir, nous ferons ainsi usage de C pour décrire les opérations effectuées sur notre EBM-LCC tout au long du processus.

Dans un premier temps, nous décrivons de manière globale dans la section 3.1 le déroulement de la reconstruction ainsi que les conditions et hypothèses qui la régissent. Ensuite, dans la section 3.2, nous présentons l'étape (1) qui consiste à charger d'emblée les données géométriques dans l'EBM-LCC afin de constituer les faces du modèle. Puis dans la section 3.3 nous expliquerons en détails les méthodes de prétraitements développées pour faire face aux défauts inhérents aux polygones des modèles chargés. Enfin nous décrirons de manière détaillée dans les sections 3.4 et 3.5, le processus de reconstruction qui se charge des étapes (2) et (3), permettant ainsi de retrouver les éléments structuraux d'un modèle et de reconstituer l'information topologique qui les lient.

3.1 VISION GLOBALE DE L'ALGORITHME DE RECONSTRUCTION

Pour passer du modèle 3D purement géométrique d'un bâtiment à son EBM-LCC enrichie en information topologique, notre approche recquiert les quatre étapes suivantes :

- le chargement de la géométrie de départ dans la 3-carte ;
- le nettoyage de la géométrie par des opérations de correction des données ;
- la reconstruction des liens β_2 reliant les faces entre elles ;
- la reconstruction des liens β_3 reliant les volumes du modèle.

Bien entendu, le bon déroulement de la reconstruction topologique dépend fortement de la validité de la description géométrique du modèle traité. En effet, plusieurs configurations sont problématiques, raison pour laquelle nous définissons un ensemble de conditions que doivent respecter les données décrivant les modèles d'entrée de notre méthode. La qualité de l'EBM-LCC final dépend ainsi de la conformité des informations de départ à ces critères. Nous expliquons dans la section 3.1.1 les différentes préconditions sur les données d'entrée, puis nous décrivons pour chaque étape de la reconstruction les informations requises en entrée et fournies en sortie, dans la section 3.1.2.

3.1.1 Préconditions sur les Données de Départ

Nous définissons ici quatre critères que doivent respecter les modèles 3D utilisés en entrée de notre méthode de reconstruction. Ces critères permettent de garantir par la suite la validité de la topologie reconstruite à travers tout le modèle. Pour tout modèle 3D étudié :

- (P1) la description géométrique doit être une soupe de polygones 3D non connectés dans l'espace, correspondant soit à un bâtiment non meublé (BIM) soit à un milieu urbain avec un ou plusieurs quartiers, sans détails sur l'intérieur des bâtiments (SIG) ;
- (P2) toute face faisant partie du modèle doit être fermée, formant ainsi un cycle de points 3D ;
- (P3) les faces doivent décrire les frontières des volumes de tel sorte que ces derniers soient des quasi-variétés 3D orientables correspondant aux différents composants du bâtiment ;
- (P4) les volumes du modèle doivent former une partition de l'espace.

Les deux premières conditions s'expliquent par le fait que notre approche est dédiée à des modèles géométriques de type CAAO bénéficiant d'une représentation en B-Rep. Par conséquent, dans le cas des modèles contenant des géométries décrites par des méthodes de sweeping ou de CSG, une conversion de la géomé-

trie en B-Rep est nécessaire avant de procéder à la reconstruction.

La troisième condition est très importante car elle correspond à une des propriétés des 3-cartes, à savoir que ces dernières ne peuvent représenter que des objets 3D qui sont des quasi-variétés orientables [93, 45]. Elle implique d'une part que tout volume du modèle doit être composé par un ensemble de faces constituant l'enveloppe à sa frontière. D'autre part ces faces doivent avoir une orientation cohérente de tel sorte que tout volume décrit ait un côté intérieur et un côté extérieur bien défini. Une autre conséquence qui découle de cette condition est que, conformément à la définition des quasi-variétés 3D, toute face du modèle ne peut être incidente à plus de deux volumes.

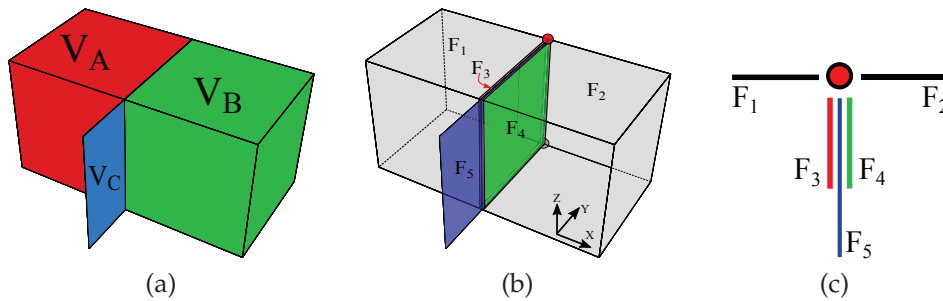


FIGURE 39 – Exemple d'une configuration problématique (a) Trois volumes V_A (rouge), V_B (vert) et V_C (bleu) qui est un volume plat. (b) Trois faces coplanaires appartenant à chacun des volumes F_3 , F_4 et F_5 . (c) Configuration des faces au niveau de l'arête commune aux trois faces coplanaires, projetées sur le plan xy .

Le dernier critère constitue une condition essentielle dans la subdivision spatiale des volumes du modèle et complète le critère qui le précède. Il exclut la présence de volumes plats et implique qu'aucun volume ne doit s'intersecter avec d'autres volumes du même modèle. La figure 39 présente le premier cas, avec la présence d'un volume sans épaisseur V_C . Ce dernier est similaire à une face et se situe entre V_A et V_B , empêchant le contact entre ces deux volumes. La figure 40 permet d'illustrer le deuxième cas avec deux volumes V_A et V_C qui présentent une intersection, résultant sur une zone volumique commune aux deux 3-cellules. Ce type de configuration est aussi considéré comme topologiquement invalide et n'est pas traité par notre méthode de reconstruction car il constitue un problème nécessitant un travail complet et spécifique.

3.1.2 Données d'Entrée et de Sortie Pour Chaque Étape

Lorsqu'un modèle 3D de bâtiment respecte les critères établis dans la section 3.1.1, nous pouvons dès lors lancer le processus de reconstruction de son infor-

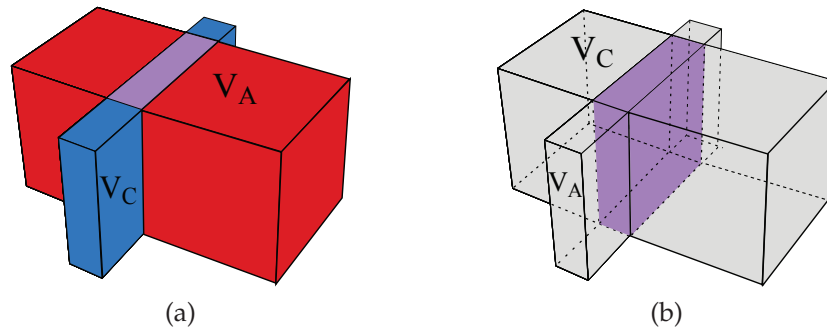


FIGURE 40 – (a) Exemple d’une intersection volumique entre deux volumes V_A (rouge) et V_C (bleu). (b) Les deux volumes partagent un espace commun.

mation topologique. La première étape, présentée dans la section 3.2, consiste à charger la géométrie fournie par le modèle dans une 3-carte afin de constituer la base de l’EBM-LCC en construction. De ce fait elle nécessite en entrée une liste de faces accompagnées de leur séquence de sommets. Cette séquence contient déjà une information topologique grâce à laquelle cette étape va fournir en sortie un EBM-LCC dans laquelle toutes les 0-cellules, 1-cellules et 2-cellules sont créées. Cependant aucun lien topologique n’existe entre les 2-cellules à ce stade.

Ensuite vient l’étape de nettoyage de la géométrie qui, comme son nom l’indique, consiste à corriger certains types d’erreurs couramment rencontrés dans les modèles 3D et qui sont détaillés dans la section 3.3. Ainsi, cette étape prend en entrée l’EBM-LCC constitué d’une soupe de 2-cellules déconnectées les unes des autres, et procède à un ensemble d’opérations de prétraitement visant à améliorer les propriétés géométriques et topologiques de ces faces. À l’issue de ces opérations, il en résulte un modèle propre sur lequel les conditions pour la reconstruction topologique sont optimales.

La troisième étape, présentée en section 3.4.1 et 3.5.3, qui consiste à la reconstruction des liens β_2 entre les 2-cellules, prend en entrée l’EBM-LCC nettoyé à la suite des opérations de prétraitements et procède à la 2-couture des faces pour former les 3-cellules du modèle. Cette étape produit donc un EBM-LCC dans lequel toutes les 2-cellules sont liées entre elles, formant des volumes topologiquement fermés et qui constituent une subdivision de l’espace.

Enfin, la dernière étape de la reconstruction, présentée en section 3.4.2 et 3.5.4, récupère toutes les 3-cellules produites par l’étape précédente et crée les liens β_3 qui les unissent. Il en ressort un EBM-LCC dans lequel toutes les cellules de toutes les dimensions sont intégralement connectées les unes aux autres, formant une composante connexe unique. Grâce à cela, il est possible d’atteindre n’importe quelle cellule du modèle à partir de n’importe quelle autre, par le biais d’opéra-

tions basées sur le parcours des liens topologiques β_1, β_2 et β_3 créés lors de la reconstruction.

3.2 CHARGEMENT DE LA GÉOMÉTRIE DANS L'EBM-LCC

Dans cette première étape, nous procédons à la création d'un EBM-LCC de base dans lequel toute la géométrie décrivant le modèle est insérée. Cette étape est triviale dans la mesure où toutes les informations nécessaires à sa mise en œuvre sont fournies par les données d'entrée. En effet, disposant d'une description de la géométrie sous forme de polygones, les coordonnées 3D et la séquence de sommets de chaque face sont directement accessibles à la lecture du fichier. Il nous suffit donc de créer les premiers éléments du EBM-LCC en générant des brins auxquels les coordonnées de points 3D sont associées en guise d'attributs. La figure 41 donne un aperçu du passage du modèle 3D conçu à l'aide d'un outil CAAO au modèle EBM-LCC initial sur lequel le reste des opérations seront effectuées.

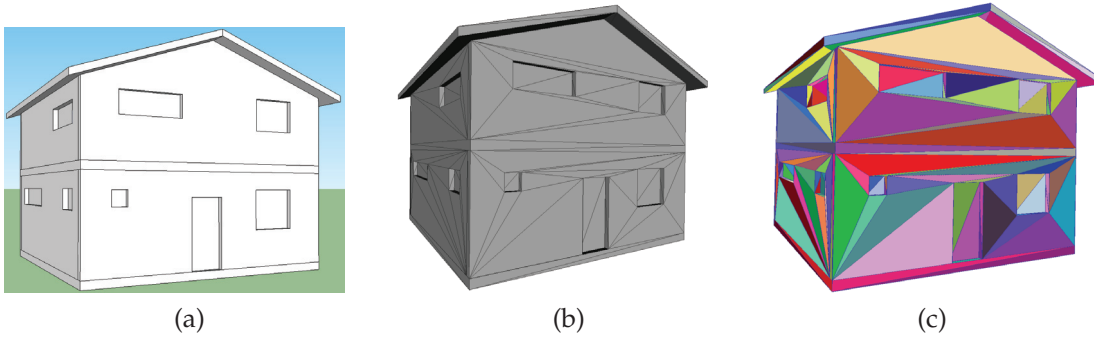


FIGURE 41 – (a) Modèle original d'une maison à un étage réalisé avec SketchUp. (b) Soupe de triangles qui décrit le modèle. (c) EBM-LCC obtenu à partir de la géométrie d'entrée.

CRÉATION DES 2-CELLULES À ce stade, C ne compte pour l'instant aucun brin : $B = \emptyset$. Considérons les informations suivantes fournies par les données d'entrée : soit $P = (p_1, \dots, p_n)$ un ensemble de n points p_i tel que $p_i = (x_i, y_i, z_i) \in \mathbb{R}^3$ avec $i \in \{1, \dots, n\}$ et $F = (F_1, \dots, F_m)$, un ensemble de m faces F_j tel que $F_j = (p_{j_1}, \dots, p_{j_{k_j}})$ avec $k_j \geq 3$ et $j \in \{1, \dots, m\}$.

Pour chaque face F_j nous procédons à la création d'un ensemble de k_j brins $B_j = (b_{j_1}, b_{j_2}, \dots, b_{j_{k_j}})$ permettant de décrire la 2-cellule correspondante dans l'EBM-LCC. Ensuite chaque brin $b_{j_r} \in B_j$ est 1-cousu avec le brin suivant dans la séquence tel que $\beta_1(b_{j_r}) = b_{j_{r+1}}$ avec $j_r \in \{1, \dots, k_j - 1\}$ et $\beta_1(b_{j_{k_j}}) = b_{j_1}$. Les 0-attributs sont ensuite créés en affectant comme attributs aux brins les coordonnées 3D des points tel que $0\text{-attr}(b_{j_r}) = p_{j_r}(x_r, y_r, z_r)$. Par ailleurs,

chaque brin formant une arête orientée, il en résulte directement la création des 1-cellules qui constituent les frontières de F_j . À la fin du chargement, $B = B_1 \cup B_2 \cup \dots \cup B_m = (b_1, b_2, \dots, b_n)$.

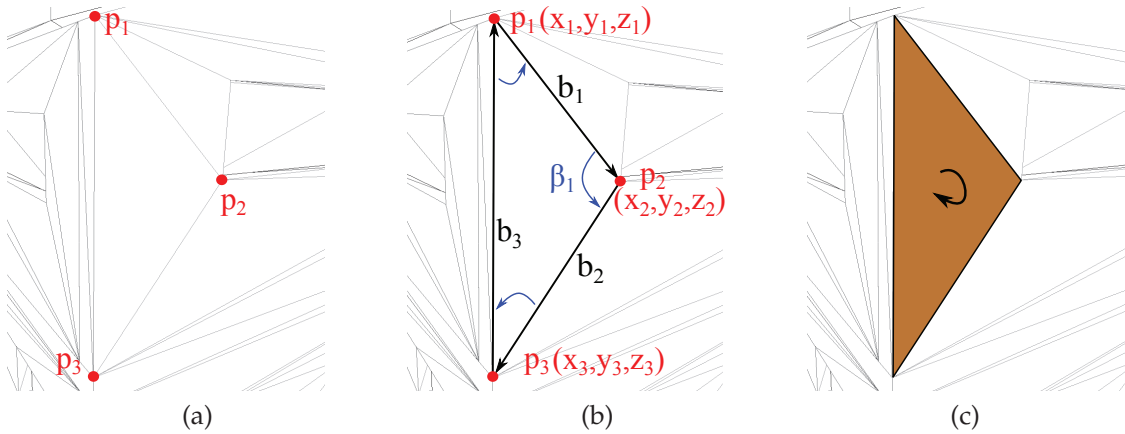


FIGURE 42 – (a) Une face décrite par une séquence de trois sommets p_1, p_2 et p_3 , dans une soupe de polygones. (b) Création de la face dans l'EBM-LCC. (c) 2-cellule orientée résultante.

La figure 42 permet d'illustrer le processus sur une face triangulaire formée par les sommets p_1, p_2 et p_3 . Trois brins b_1, b_2 et b_3 sont créés et p_1, p_2 et p_3 sont affectés comme attributs à leurs 0-cellules tel que $0\text{-attr}(b_1) = p_1$ (de même pour b_2 et p_2 , ainsi que pour b_3 et p_3). Les 1-cellules orientées sont ainsi obtenues en prenant les 0-cellules deux à deux dans le sens de la séquence. Enfin, en liant par β_1 b_1, b_2 et b_3 (cf. figure 42b) la 2-cellule orientée de la figure 42c est créée avec $\beta_1(b_1) = b_2$, $\beta_1(b_2) = b_3$ et $\beta_1(b_3) = b_1$.

3.3 PRÉTRAITEMENTS

Il est rare de pouvoir prétendre à une reconstruction topologique correcte directement à partir des données brutes d'un modèle bâtiment. En effet bon nombre d'entités géométriques sont sources de corruption pour les informations topologiques. Ce problème est très bien connu dans le domaine et est sans doute la raison pour laquelle une quantité conséquente de modèles disponibles restent le plus souvent intégralement ou en partie inexploitable pour des applications d'analyses et de calculs. Nous qualifions ainsi de modèles propres ceux qui ne présentent pas ces défauts, ou qui en contiennent en nombre assez négligeable pour ne pas perturber les opérations requises pour une bonne reconstruction topologique. Par conséquent, pour obtenir des résultats optimaux lors de notre processus d'enrichissement d'informations de modèles bas niveaux, quelques étapes de nettoyage des fichiers d'entrée semblent donc incontournables.

À travers l'exploitation des différents types de modèles, nous avons identifié plusieurs types de problèmes récurrents. Ils sont souvent involontaires, mais peuvent tout aussi être intentionnels. En effet dans le but de produire des effets visuels ciblés, les designers peuvent faire usage d'astuces leur permettant de faire ressortir ou dissimuler des formes ou composants du modèle. Ils peuvent ainsi rajouter des géométries qui faussent la description topologique d'un composant ainsi que l'interprétation qui pourrait en être faite lors d'opérations de simulation par exemple. Par ailleurs, les méthodes de création des modèles contribuent de manière conséquente à la présence de géométrie dégénérées. Des procédés comme la reconstruction à partir de nuages de points par exemple sont plus à même d'inclure des erreurs de géométrie, qui sont les conséquences de données manquantes (occlusion lors des scans) ou de reconstruction approximatives. Bien que plus précis et détaillés, les modèles bâtiments créés avec des outils CAAO peuvent aussi présenter les symptômes précédemment cités. En effet, il n'est pas rare que des opérations de simplifications automatiques résultent sur des pertes de données qui sont cruciales à l'interprétation topologique et sémantique.

Dans cette section, nous traitons la géométrie chargée dans le EBM-LCC à l'issue de la phase précédente (cf. section 3.2). Un ensemble d'opérations de correction de ces entités géométriques est défini afin d'éviter un maximum d'erreurs lors de la reconstruction topologique. L'objectif est de réduire les problèmes au point de les rendre négligeables à défaut de totalement les supprimer. Ces opérations spécifiques se sont montrées nécessaires à travers nos diverses expériences et sont effectuées dans l'ordre suivant :

- fusion des 0-cellules proches ;
- suppression des 2-cellules dégénérées ;
- correction des 2-cellules complexes ;
- suppression des clones ;
- fusion des 2-cellules coplanaires.

La dernière étape constitue plus une phase d'optimisation que de correction, car elle permet de réduire le nombre de faces avant la reconstruction de leurs liens β_2 . Nous proposons dans les sous sections suivantes une explication détaillée de l'ensemble de ces opérations de prétraitement.

3.3.1 Fusion des 0-cellules proches

Souvent dû à des problèmes d'imprécision, certains sommets du modèle ont des valeurs très proches, mais ne sont pas confondus dans l'espace. Cela a pour conséquence de créer de petits espaces qui s'avèrent problématiques pour reconstruire une topologie correcte. Une illustration de ce problème est présentée

dans la figure 43. Un grossissement au niveau du point commun à F_A , F_B et F_C permet de mettre en évidence un petit espace entre F_A et F_B (cf. figure 43b) du fait des coordonnées des sommets p_A et p_B qui sont légèrement différentes.

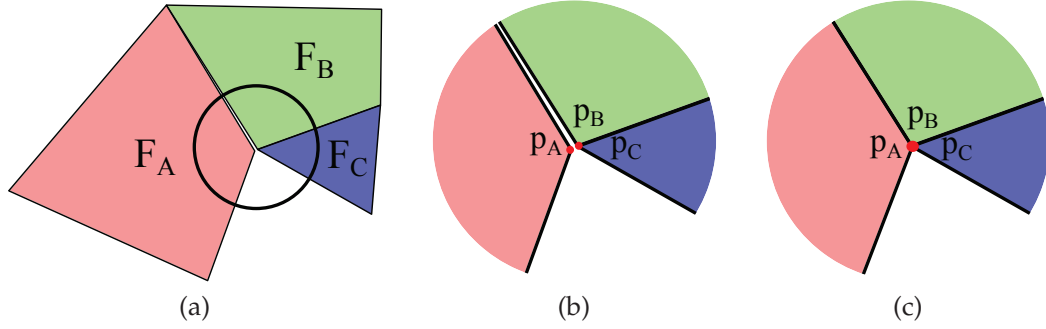


FIGURE 43 – (a) Exemple de trois faces voisines F_A , F_B et F_C . (b) Les sommets p_B et p_C sont confondus, tandis que p_A leur est très proche mais pas confondu. (c) p_A est légèrement déplacé pour être fusionné avec p_B et p_C .

Pour corriger ce problème, l'approche adoptée consiste à déplacer légèrement certains sommets du modèle afin d'uniformiser leur position avec les sommets voisins (cf. figure 43c). Pour toute paire de brins $\{b_1, b_2\} \subset B$ avec $0\text{-attr}(b_1) = p_1(x_1, y_1, z_1)$ et $0\text{-attr}(b_2) = p_2(x_2, y_2, z_2)$, si la distance L qui sépare p_1 et p_2 est telle que :

$$L = \|\overrightarrow{p_1 p_2}\| = \sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2 + (z_2 - z_1)^2} \simeq 0 \quad (1)$$

alors $0\text{-attr}(b_2) \leftarrow p_1$. En d'autres termes nous procédons à un réajustement des 0-cellules proches de leurs voisins en modifiant les 0-attributs qui leur sont associés. Une opération de tri sur l'ensemble des 0-cellules de C est effectuée en fonction de leurs coordonnées, pour faciliter la recherche de voisins. À l'issue de cette opération de prétraitement, seul les 0-attributs de certains brins de C auront subi des modifications, mais le nombre de 0-cellules, 1-cellules et 2-cellules ne change pas.

3.3.2 Suppression des 2-cellules dégénérées

Tout polygone présentant une surface nulle ou quasi-nulle est considéré comme dégénéré. En effet, il arrive souvent que bon nombre de polygones soient décrits par des ensembles de points alignés ou confondus, résultant sur des faces à superficie négligeable ou nulle. La figure 44 illustre le genre de configurations typiques dans lequel des 2-cellules dégénérées s'inscrivent parmi d'autres qui sont valides. La présence de F_D dans le lot de polygones (cf. figure 44) fausse les liens topologiques entre les faces et constitue un obstacle à la méthode de reconstruction des liens β_2 que nous pouvons déduire entre les 2-cellules (cf. section 3.4.1). Un test de contact entre F_A et F_B peut ainsi s'avérer négatif du fait de la 1-cellule

$[p_1 p_2] \in F_D$.

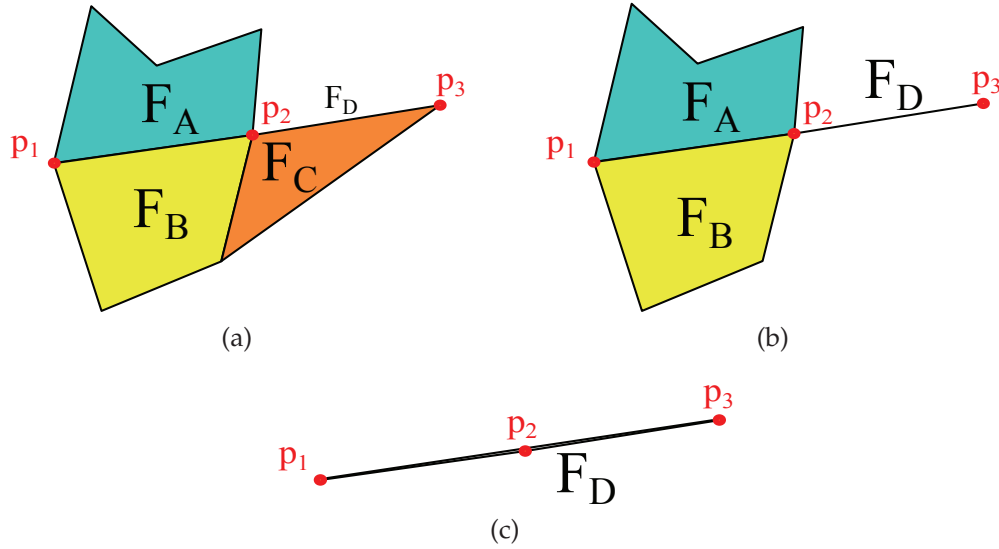


FIGURE 44 – (a) Quatres faces F_A , F_B , F_C et F_D partageant des arêtes. (b) Cacher F_C fait apparaître une partie de F_D . (c) En cachant toutes les faces, il apparaît que F_D est un polygone dégénéré avec des 0-cellules quasi alignées p_1 , p_2 et p_3 .

De ce fait, les 2-cellules dégénérées doivent être supprimées de la 3-carte afin de favoriser une interprétation correcte des liens topologiques. Leur détection peut se faire soit par le calcul de leur vecteur normal dont la norme sera logiquement nulle ou par le calcul de leur aire qui sera également nulle. Sachant que les 2-cellules présentes dans C peuvent être des polygones irréguliers, nous discutons dans le paragraphe suivant de l'approche que nous avons adopté pour un calcul robuste de la normale ainsi que de l'aire d'une face quelconque.

NORMALE ET AIRE D'UNE 2-CELLULE La méthode classique pour déterminer le vecteur normal d'une 2-cellule consiste à récupérer trois de ses 0-cellules non alignées et de déterminer le produit vectoriel des deux vecteurs formés par ces 0-cellules. Par exemple, considérons le polygone de la figure 45a, les points p_1 , p_2 et p_4 n'étant pas alignés, nous pouvons considérer les vecteurs $\vec{V}_{1,2}$ et $\vec{V}_{1,4}$ et en déduire la formule suivante :

$$\vec{N} = \vec{V}_{1,2} \wedge \vec{V}_{1,4} \quad (2)$$

Cependant, cette manière de déterminer la normale est limitée dans la mesure où, en plus de nécessiter une vérification de l'alignement des points choisis pour le calcul, la 2-cellule doit être convexe et parfaitement plane pour garantir un résultat robuste. Dans nos travaux il arrive fréquemment d'avoir affaire à des faces concaves ou comportant des points alignés et rien ne garanti leur planarité au chargement des données d'entrée. Par exemple, dans le polygone de la

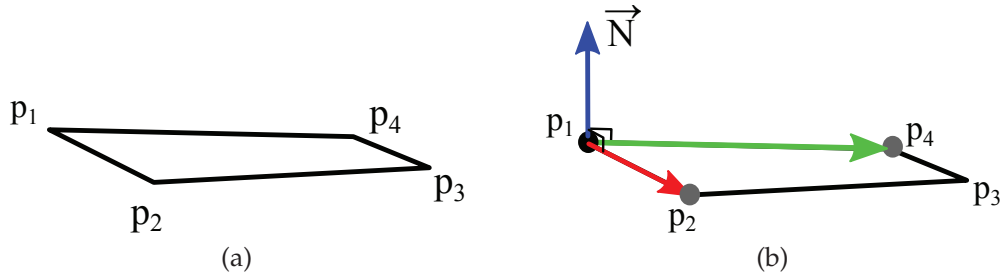


FIGURE 45 – (a) Calcul du vecteur normal sur un polygone simple. (b) Vecteur normal \vec{N} obtenu par le produit vectoriel des vecteurs $\vec{V}_{1,2}$ et $\vec{V}_{1,4}$.

figure 46 qui est concave en p_5 , appliquer l'équation 2 aux trois points p_4, p_5 et p_6 en considérant p_5 comme le point central donnerait un vecteur normal de direction opposée à celui obtenu en utilisant les points p_5, p_6 et p_7 . Et pour le trio de points alignés p_1, p_2 et p_3 , nous obtiendrions une normale nulle.

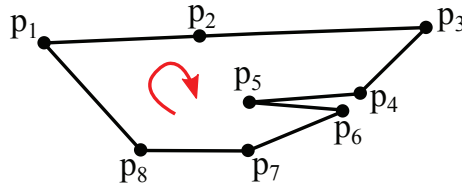


FIGURE 46 – Exemple de polygone concave pour lequel l'usage du produit vectoriel pour déterminer robustement la normale nécessiterait plusieurs vérifications.

Pour pallier à ces problèmes, nous utilisons une méthode bien plus robuste numériquement, connue sous le nom de méthode de Newell [107]. Cette méthode, en plus de pouvoir gérer la concavité, et la colinéarité des points d'une même face, traite aussi les polygones pas tout à fait planaires, produisant la meilleure approximation possible le cas échéant [139]. Soit $\vec{N} = (n_x, n_y, n_z)$ la normale de Newell d'une 2-cellule formée par une séquence de 0-cellules p_1, \dots, p_n , avec $p_i = (x_i, y_i, z_i) \in \mathbb{R}^3$ et $p_{n+1} = p_1$. Les composantes de \vec{N} sont calculées de la manière suivante :

$$\begin{aligned}
 n_x &= 2A_{yz} = \sum_{i=1}^n (y_i - y_{i+1})(z_i + z_{i+1}) \\
 n_y &= 2A_{zx} = \sum_{i=1}^n (z_i - z_{i+1})(x_i + x_{i+1}) \\
 n_z &= 2A_{xy} = \sum_{i=1}^n (x_i - x_{i+1})(y_i + y_{i+1})
 \end{aligned} \tag{3}$$

avec A_{yz} , A_{zx} et A_{xy} les aires respectives des projections de la 2-cellule sur les plans Cartésiens yz , zx et xy . Il est prouvé que ces aires sont proportionnelles aux coefficients du vecteur normal de la face en question [140]. La méthode de Newell définit ainsi chaque composante de \vec{N} comme la somme des aires signées des surfaces formées par chaque segment du polygone et un point extérieur, projetées sur un des plans Cartésiens.

Par ailleurs, grâce à sa définition, cette approche permet en plus d'obtenir directement l'aire de la 2-cellule concernée. En effet, comme démontré dans [138], la valeur de la surface d'un polygone donné correspond à la moitié de la norme de son vecteur normal de Newell obtenu avec l'équation 3. Soit F une 2-cellule dont le vecteur normal de Newell équivaut à $\vec{N}_F = (n_x, n_y, n_z)$. L'aire de F est obtenue de la manière suivante :

$$A_F = \frac{1}{2} \|\vec{N}\| = \frac{1}{2} \sqrt{n_x^2 + n_y^2 + n_z^2} \quad (4)$$

Ainsi, toute 2-cellule $F \in C$, telle que $A_F \simeq 0$ est supprimée de l'EBM-LCC. Puisque chaque face est, pour le moment, isolée des autres, cette suppression se réalise simplement en retirant de B tous les brins de la 2-cellule identifiée comme dégénérée.

3.3.3 Correction des 2-cellules non simples

Un polygone simple est un polygone dont chaque arête est formée par deux points distincts et aucune arête n'en croise une autre tout au long de la séquence d'arête qui délimite sa surface. La frontière d'un tel polygone est donc formée par une ligne polygonale fermée du plan [162]. À contrario, une 2-cellule non simple, que nous appelons ici 2-cellule complexe, possède une frontière mal définie. Ce type de faces pose problème sur bon nombre d'opérations géométriques, particulièrement quand il est nécessaire de distinguer l'intérieur du polygone de son extérieur. Nous avons pu recenser deux types de polygones complexes qui interviennent plus ou moins régulièrement dans les données récupérées en entrée de nos modèles de bâtiments :

- les polygones ayant des doublons dans leur séquence de 0-cellules ;
- les polygones possédant des extensions géométriques insignifiantes par rapport à leur surface globale.

Une solution triviale à une partie de ces problèmes de 2-cellules complexes serait la triangulation de toutes les faces de plus de trois sommets. Mais le revers d'une telle approche serait une augmentation importante du nombre de 2-cellules qui augmenterait le temps de calcul consacré à la méthode de recons-

truction topologique (cf. section 3.4). Nous présentons ici les solutions adoptées pour faire face aux problèmes précédemment cités.

Doublons et mauvaises séquences des 0-cellules

Certaines 2-cellules présentent des problèmes dans la séquence de leur sommets. Ce sont les cas les moins problématiques, se manifestant par plusieurs 0-cellules ayant des 0-attributs égaux dans la même séquence d'une 2-cellule. Un ensemble de situations possibles est illustré à travers les figures 47 et 48.

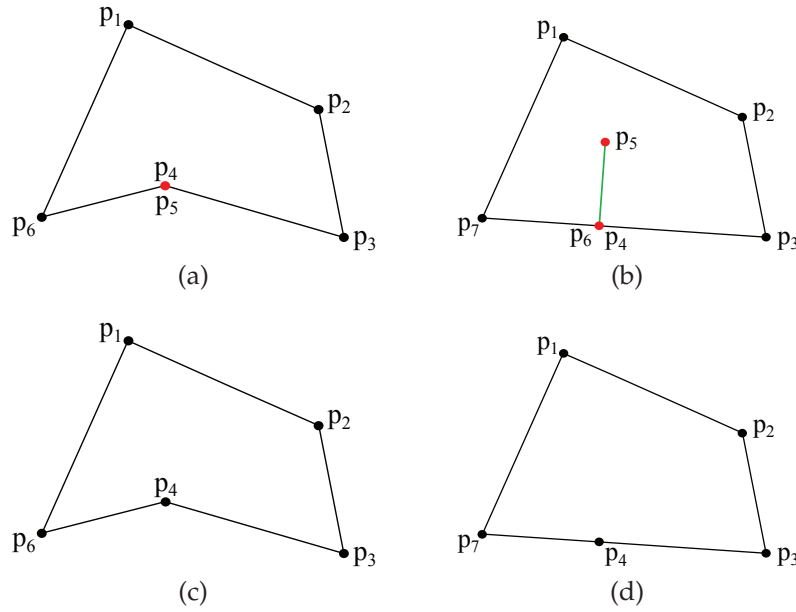


FIGURE 47 – (a) Les 0-cellules p_4 et p_5 sont confondues formant ainsi une 1-cellule invalide. (b) p_4 et p_6 sont confondues et les 1-cellules $[p_4p_5]$ et $[p_5p_6]$ s'intersectent. (c) Correction de (a) par la suppression de p_5 . (d) Correction de (b) par la suppression de p_5 et p_6 .

Pour corriger ces problèmes et obtenir des frontières simples sur les 2-cellules, la solution adoptée consiste à conserver la première 0-cellule considérée comme l'originale puis à supprimer celles qui constituent les doublons et qui complexifient les séquences. Cependant, afin de garantir une modification géométrique légère des 2-cellules, les doublons ne sont supprimés que s'ils sont séparés de l'original par au plus une 0-cellule différente dans la séquence. Soit la 2-cellule $F = (B_F, \beta_1) \in C$ contenant k 0-cellules et k brins distincts tel que $B_F = (b_1, b_2, \dots, b_k) \subset B$ et définie par la séquence de sommets $S_F = \{p_1, p_2, \dots, p_k\}$ avec $b_{k+1} = b_k$ et $p_{k+1} = p_k$. Pour toute paire de brins $\{b_i, b_{i+1}\} \in B_F$, si $0\text{-attr}(b_i) = 0\text{-attr}(b_{i+1}) \neq 0\text{-attr}(b_{i+2})$, alors seul b_{i+1} est supprimé et p_{i+1} retiré de S_F (cf. figure 47c). Par ailleurs si $0\text{-attr}(b_i) = 0\text{-attr}(b_{i+2})$ alors b_{i+1} et b_{i+2} sont supprimés de B_F . Les points p_{i+1} et p_{i+2} correspondants sont aussi retirés

de la séquence S_F (cf. figure 47d).

En limitant ainsi la suppression des doublons à deux brins au delà du brin de la 0-cellule originale, les modifications géométriques engendrées sont invisibles dans le cas où l'original et le doublon se suivent dans la séquence, comme illustrée par la figure 47a. En supprimant le brin b_5 correspondant à p_5 , la frontière de la face est débarrassée de la 1-cellule de longueur nulle formée par p_4 et p_5 (cf. figure 47c). Dans le cas où il y a un brin qui sépare l'original et le doublon, la configuration qui se présente constitue un "aller-retour" résultant sur deux 1-cellules confondues, à l'image des segments $[p_4p_5]$ et $[p_5p_6]$ de la face de la figure 47b. En supprimant b_5 et b_6 , la surface intérieure est débarrassée de ces segments n'apportant pas d'information utile (cf. figure 47d).

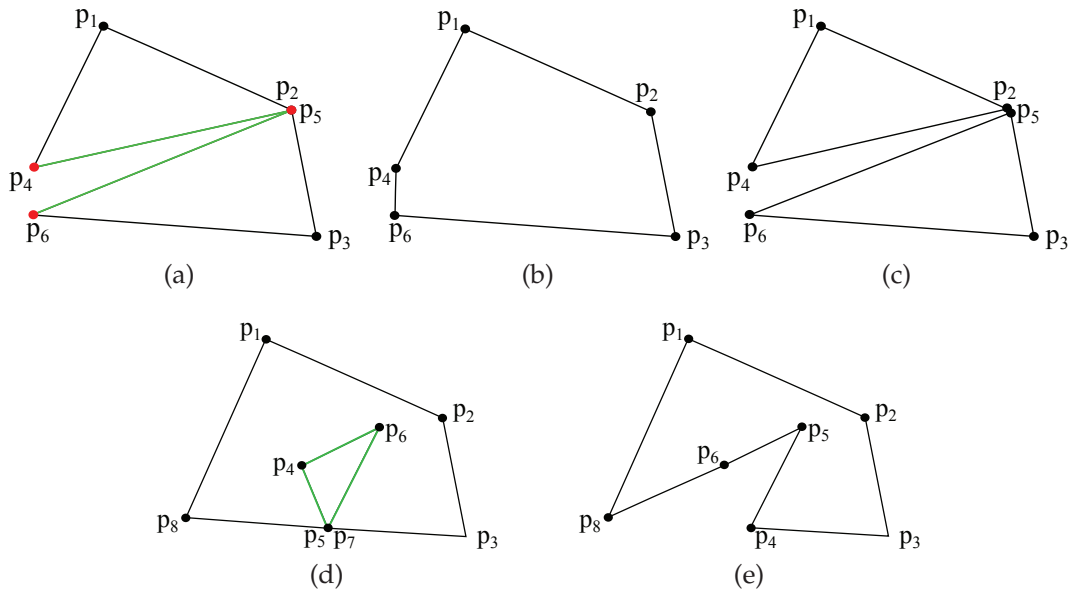


FIGURE 48 – (a) La 2-cellule est quasiment coupée en deux du fait que les points de p_2 et p_5 soient égaux. (b) Résultat après la suppression de p_5 . (c) Autre correction possible impliquant de séparer la faces en deux. (d) Cas d'une face décrivant un trou fermé en un même point à la frontière (p_4 et p_7). (e) Résultat de la correction par suppression de p_7 .

Par contre, lorsqu'il y a plus d'un brin entre la 0-cellule originale et un de ses doublons, la correction par la suppression résulte très souvent sur des modifications géométriques importantes. La figure 48 montre quelques exemples permettant d'exposer les différences engendrées par l'opération. Il s'avère même dans certains cas que d'autres solutions semblent plus adéquates que la suppression, comme c'est le cas pour la face de la figure 48a. Pour toutes ces raisons, nous ne traitons pas ici les cas similaires.

Extensions Géométriques Inutiles

Il peut arriver qu'une partie d'un polygone constitue une extension indésirable ou sans intérêt pour la face. C'est le cas des polygones sans trous qui comportent des parties de leur frontière qui se touchent ou sont confondues comme illustré dans la figure 49. Ainsi nous pouvons aisément constater que les arêtes liées à p_5 de la figure 49a ou à p_4 de la figure 49b peuvent être retirées de leurs polygones respectifs sans conséquences sur la surface occupée par ces derniers.

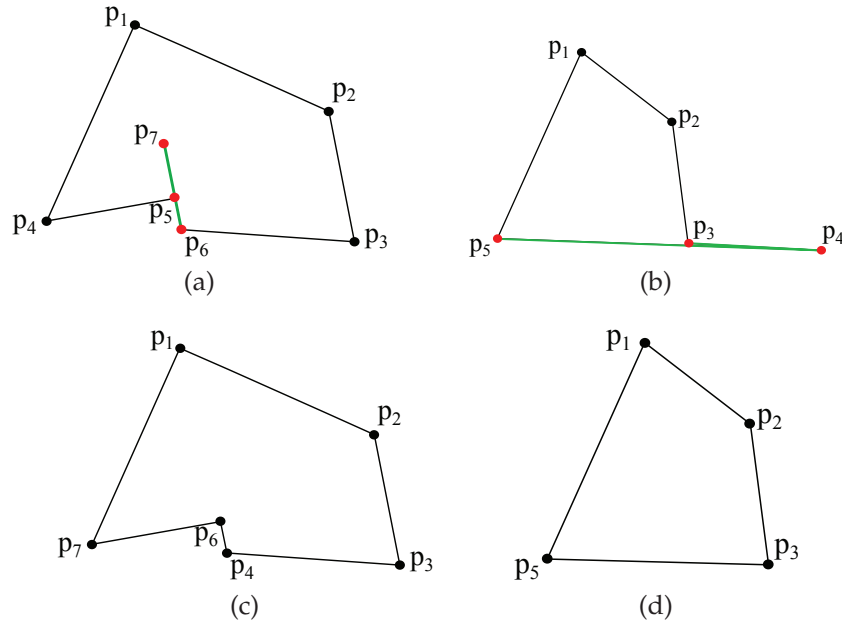


FIGURE 49 – (a) $[p_4p_5]$ est partiellement confondue avec $[p_5p_6]$ mais ne débouche sur aucun trou. (b) $[p_3p_4]$ est quasiment confondue avec $[p_4p_5]$ et décrit une surface négligeable. (c) Correction de (a) par la suppression de p_5 . (d) Correction de (b) par la suppression de p_4 .

Pour corriger ce genre de problèmes, nous procédons d'abord à la détection des 0-cellules à travers lesquelles les arêtes confondues sont liées par β_1 dans la 2-cellule. La faiblesse de la valeur de l'angle formé à leur niveau caractérise ces points particuliers. En prenant l'exemple du point p_5 (figure 49a) et en considérant les vecteurs $\vec{V}_{4,5}$ et $\vec{V}_{5,6}$, l'angle $\theta_{4,5,6} = \widehat{p_4p_5p_6}$ est calculé de la manière suivante :

$$\theta_{4,5,6} = \arccos\left(\frac{\vec{V}_{5,6} \cdot \vec{V}_{4,5}}{\|\vec{V}_{5,6}\| \|\vec{V}_{4,5}\|}\right) \quad (5)$$

Ainsi, si $\theta_{4,5,6} \simeq 0$, le point p_5 est supprimé, et la séquence de sommets devient $\{p_1, p_2, p_3, p_4, p_6, p_7\}$ (cf. figure 49c). Similairement, le point p_4 de la figure 49b sera aussi supprimé et la séquence finale du polygone sera $\{p_1, p_2, p_3, p_5\}$ (cf. figure 49d). Il n'y a à ce stade que des faces sans relations topologiques les unes

par rapport aux autres dans la 3-carte. De ce fait les opérations de simplification des 2-cellules influent simplement sur la géométrie de ces dernières mais pas sur leur nombre dans C . Il est important de se limiter à de légères corrections, pour éviter de créer des espaces entre des faces initialement en contact.

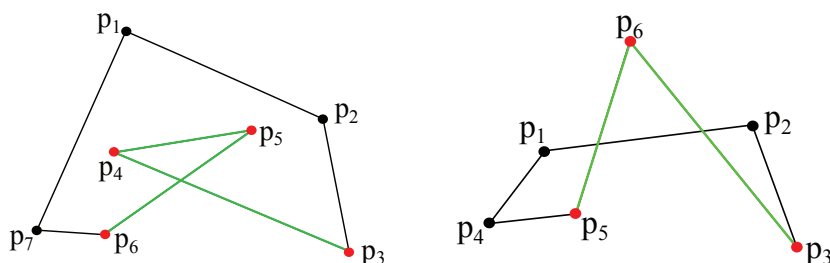


FIGURE 50 – Exemple de polygones complexes non traités.

Par ailleurs, les configurations pouvant rendre une 2-cellule complexe sont très nombreuses. Les approches de correction que nous proposons ici permettent de venir à bout des cas les plus couramment rencontrés dans nos modèles de bâtiments. Il existe des cas plus complexes à l’image de ceux illustrés dans la figure 50. Mais ces derniers ne sont pas traités et les données d’entrée sont supposées suffisamment propres pour ne pas contenir de problèmes de ce type.

3.3.4 *Suppression des clones*

En parcourant les 2-cellules obtenues à l’issue du chargement des données d’entrée, il n’est pas rare de tomber sur des faces identiques que nous appelons des clones de la première face originale trouvée. Ces clones ayant exactement les mêmes propriétés géométriques, topologiques et la même séquence de points que leurs originaux, ils n’apportent aucune information en plus, pouvant aider dans le processus de reconstruction topologique. Au contraire, ils peuvent prêter à confusion, conduisant à des erreurs d’interprétation entre les faces au moment de retrouver les relations topologiques qui les lient. Par conséquent ces faces clonées sont tout simplement supprimées de C , ce qui réduit le nombre de 2-cellules et de brins dans B .

3.3.5 *Fusion des 2-cellules coplanaires*

Afin d’optimiser les temps d’exécution de nos différentes approches de reconstruction, nous procédons à la simplification des faces du modèle dans le but de réduire leur nombre. L’objectif est de fusionner les polygones coplanaires et partageant des arêtes communes, de manière à minimiser le nombre de 2-cellules représentant une surface. Pour se faire, nous étudions dans un premier temps la coplanarité entre les 2-cellules de C , puis nous passons à l’étape de la fusion proprement dite en respectant les contraintes explicitées par la suite.

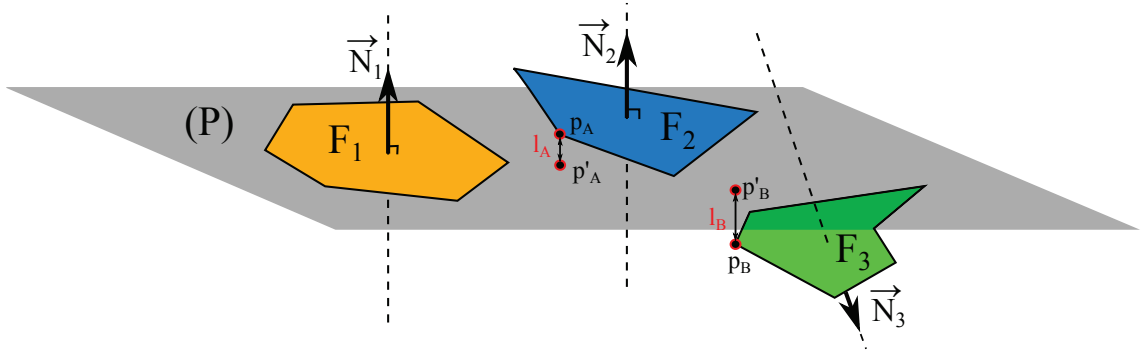


FIGURE 51 – Test de coplanarité entre le polygone F_1 et les autres (F_2 et F_3). (P) est le plan contenant F_1 ; \vec{N}_1 , \vec{N}_2 et \vec{N}_3 sont les vecteurs normaux respectifs des polygones; p'_A (resp. p'_B) est la projection orthogonale de p_A (resp. p_B) sur (P) et l_A (resp. l_B) est la distance entre p_A et p'_A (resp. p_B et p'_B).

Coplanarité entre deux polygones

Soit F_1 et F_2 deux faces, avec \vec{N}_1 et \vec{N}_2 leurs vecteurs normaux obtenus avec l'équation 3. Soit $\theta_{1,2}$ l'angle entre \vec{N}_1 et \vec{N}_2 tel que :

$$\theta_{1,2} = \arccos\left(\frac{\vec{N}_1 \cdot \vec{N}_2}{\|\vec{N}_1\| \|\vec{N}_2\|}\right) \quad (6)$$

Soit $p_2(x_2, y_2, z_2)$ un point de F_2 , $p'_2(x'_2, y'_2, z'_2)$ la projection orthogonale de p_2 sur le plan 3D contenant F_1 et $l = \|p_2 p'_2\|$. F_1 et F_2 sont coplanaires si :

$$\left\{ \begin{array}{l} \theta_{1,2} \simeq 0 \\ \text{et} \\ l = \sqrt{(x_2 - x'_2)^2 + (y_2 - y'_2)^2 + (z_2 - z'_2)^2} \simeq 0 \end{array} \right. \quad (7)$$

La figure 51 nous permet d'illustrer les tests de coplanarité entre plusieurs 2-cellules. Intéressons nous à F_1 , contenue dans le plan (P) pour voir si F_2 et F_3 lui sont colinéaires. La première condition est l'alignement dans une même direction de leur vecteurs normaux. Il apparait alors que \vec{N}_1 et \vec{N}_2 ($\theta_{1,2} \simeq 0$) sont alignés, à la différence de \vec{N}_3 ($\theta_{1,3} > 0$). La face de ce dernier (F_3) n'est donc pas retenu pour le reste du processus. Ensuite si $l_A \simeq 0$, F_1 et F_2 seront considérées comme coplanaires.

Fusion des 2-cellules

La coplanarité entre deux 2-cellules n'est pas la seule condition pour pouvoir les fusionner. En effet, il faut aussi que ces dernières partagent une arête commune. Ainsi, c'est à travers cette arête commune que la fusion se fera pour donner une face plus grande. Bien qu'elle soit effectuée avant la reconstruction topologique en tant que telle, cette opération fait déjà intervenir la création de

liens β_2 entre les faces à fusionner. Ce lien β_2 permet la fusion des faces 2-cousues grâce à la suppression de leur arête partagée dans la 3-carte. Cependant seules les arêtes incidentes à deux faces sont concernées. Les arêtes incidentes à plus de deux faces sont traitées dans la section 3.4.1.

Considérons deux 2-cellules $F_i \in C$ décrite par l'ensemble de brins $B_i \in B$ et $F_j \in C$ avec $B_j \in B$ et $F_i \neq F_j$. Si F_i et F_j sont coplanaires conformément à l'équation 7 et qu'il existe deux brins $b_i \in B_i$ et $b_j \in B_j$ tel que les arêtes contenant b_i et b_j ont la même géométrie, nous procédons alors dans un premier temps à la 2-couture entre $2\text{-cell}(b_i)$ et $2\text{-cell}(b_j)$ le long des brins b_i et b_j puis à la 1-suppression de $1\text{-cell}(b_i)$. Cette opération de 1-suppression permet directement de fusionner F_i et F_j (cf. section 2.5.3). Dans la figure 52 un volume présentant un trou est illustré. La fusion des faces F_A et F_B donne dans un premier temps la face F_{AB} (cf. figure 52b). La fusion de toutes les faces de F_A à F_F va former une face unique regroupant toutes les autres faces (cf. figure 52c).

Cependant, nous évitons dans nos travaux la fusion totale des faces lorsque la surface qu'elles forment contient des trous car cela entraînerait une déconnexion de la 3-carte. De ce fait, pour chaque trou il est nécessaire d'avoir au moins une arête reliant sa frontière à celle de la surface qui la contient. Pour cette raison, les arêtes formées par deux brins de la même 2-cellule ne sont pas supprimées. C'est par exemple le cas de l'arête illustrée en rouge dans la figure 52c. Par ailleurs, une telle face bien que géométriquement et topologiquement correcte, ne constitue pas un polygone simple, et appartient à la catégorie des polygones qualifiés de "faiblement simples". Il s'agit en d'autres termes de polygones ayant des côtés qui se touchent sans pour autant se croiser [162]. Afin de ne travailler qu'avec des 2-cellules simples, notre méthode permet de s'arrêter à l'obtention de faces simples ou bien unique faiblement simple (cf. figure 52d).

La solution adoptée pour avoir des faces simples consiste simplement à insérer une nouvelle arête dans la face faiblement simple afin de la découper en deux faces simples. Soit F_k une 2-cellule renfermant un trou et faiblement simple contenant deux brins b_{k_m} et b_{k_n} , tel que $\beta_2(b_{k_m}) = (b_{k_n})$, constituent l'arête qui relie le trou à la frontière extérieure. F_k formant un circuit fermé de brins, nous identifions deux cycles de brins o_1 et o_2 à l'intérieur de F_k : o_1 commençant par (b_{k_m}) et s'achevant au brin $b'_{k_n} = \beta_0(b_{k_n})$, et o_2 commençant par b_{k_n} et s'achevant à $\beta_0(b_{k_m})$. Un cycle correspond à la frontière extérieure et l'autre à celle intérieure. Pour les différencier nous comparons les surfaces occupées par les polygones que forment o_1 et o_2 , la plus petite correspondant au trou. Supposons que o_2 soit le circuit décrivant le trou, alors nous insérons une 1-cellule entre le couple de brins $b \in o_1$ et $b' \in o_2$ tels que $b \neq b_{k_m}$ et $b' \neq b_{k_n}$ et le segment entre les points de b et b' est le plus petit possible en longueur. Ce dernier critère permet de garantir que l'arête insérée n'en intersecte aucune autre de la même

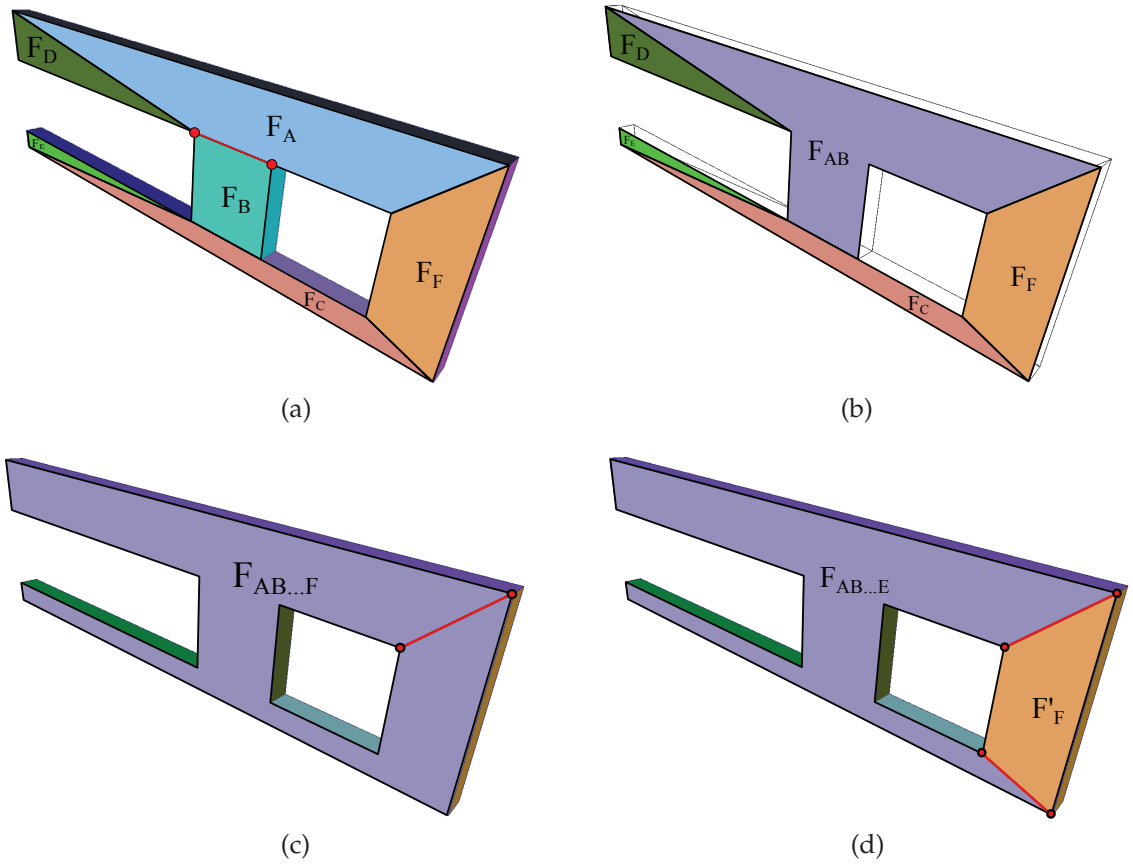


FIGURE 52 – Modèle d'un volume représenté par plusieurs faces. (a) Les 2-cellules F_A, F_B, \dots, F_F sont tous coplanaires ; F_A et F_B partagent une arête commune (en rouge). (b) F_A et F_B sont fusionnées. (c) Une arête (en rouge) est maintenue pour empêcher la fusion totale et décrire le trou. (d) Insertion d'une nouvelle arête pour former F'_F .

face. Dans l'exemple de la figure 52d, l'insertion d'une nouvelle arête permet de recréer une face F'_F équivalente à F_F et de couper la surface en deux faces simples. Cette phase de prétraitement permet ainsi de diminuer considérablement le nombre de 2-cellules dans C (cf. section 5.1.4).

Cette étape met fin aux opérations de prétraitement sur les données d'entrée. À partir de C , nous avons donc un nouveau modèle EBM-LCC nettoyé $C_N = (B_N, \beta_1, \beta_2 = \emptyset, \beta_3 = \emptyset)$, avec $B_N \subseteq B$. C_N est constitué d'un ensemble de 2-cellules dont les propriétés géométriques et topologiques ont été passées en revue et validées. Nous sommes donc en mesure de procéder à la reconstruction topologique proprement dite, décrite à la section suivante.

3.4 METHODE DE RECONSTRUCTION CLASSIQUE

Nous décrivons, dans cette section notre méthode de reconstruction des relations spatiales qui lient les différents composants d'un modèle 3D de bâtiment. L'information topologique est cruciale pour un nombre important d'applications qui interviennent de près ou de loin dans le processus de construction d'un bâtiment. La complexité de la tâche, en plus de celle des modèles fait qu'une reconstitution manuelle complète de ces relations spatiales entre les composants ne serait pas envisageable dans le cadre d'un projet avec des contraintes de temps. Pour pallier à l'absence de ces informations tout en constituant un gain de temps, les méthodes que nous proposons sont totalement automatiques et produisent des résultats plus qu'encourageants.

À ce niveau du processus d'enrichissement, nous avons à disposition C_N , un EBM-LCC constitué par un ensemble de 2-cellules non connectées et débarrassé d'une grande partie de ses éléments parasites. En d'autres termes nous partons d'un ensemble de polygones dans l'espace qui, lorsqu'ils sont considérés dans leur ensemble, forment visuellement le bâtiment avec tous ses éléments structurels (cf. figure 41b). Cependant, prises une par une, ces faces n'ont pour le moment aucun liens entre elles. Afin de reconstruire et de décrire entièrement la structure topologique du modèle, les entités du bâtiment doivent être reconstituées et leurs relations spatiales doivent être retrouvées à partir de la géométrie d'entrée.

La reconstitution des composants passe par une subdivision cellulaire s'aidant du formalisme d'une 3-carte. Cette subdivision suivie de la reconstruction topologique se fait dans l'ordre croissant de dimension, en deux étapes principales :

- liaison par β_2 des 2-cellules pour créer les 3-cellules ;
- liaison par β_3 des 3-cellules pour les interconnecter.

3.4.1 *Reconstruction des liens entre les 2-cellules*

Cette étape de notre reconstruction topologique consiste à relier par β_2 les 2-cellules afin de créer les différents volumes de l'EBM-LCC. Une bonne reconstruction doit aboutir à une subdivision volumique de l'espace occupé par les faces de telle sorte que chaque volume soit fermé et corresponde à un composant significatif du bâtiment (mur, plancher, etc.).

Conditions à Remplir pour une Opération de 2-couture

Pour être en mesure de 2-coudre deux faces dans une 3-carte sans que cela n'entraîne de modifications géométriques, deux propriétés doivent être satisfaites : (1) les faces doivent avoir au moins une frontière commune représentée par deux arêtes de même géométrie et (2) les 1-cellules correspondantes à l'arête commune doivent avoir des orientations opposées.

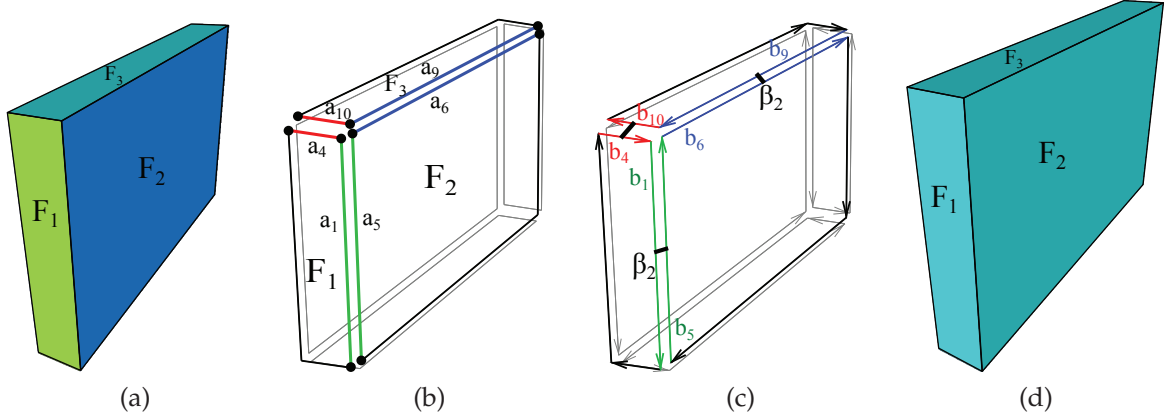


FIGURE 53 – (a) Mur constitué de six 2-cellules dont F_1, F_2 et F_3 . (b) Mise en évidence des arêtes confondues. (c) Mise en évidence des liens topologiques β_2 (gros trait noir) entre les 2-cellules. (d) Volume mur reconstruit.

La figure 53 met en scène un ensemble de 2-cellules formant un volume mur. Au départ, les 2-cellules sont déconnectées les unes des autres (cf. figure 53a), conformément à ce qui est obtenu après le chargement de la géométrie (cf. section 3.2) et les étapes de prétraitement. La figure 53b, illustre les arêtes qui constituent les 2-cellules F_1, F_2 et F_3 tel que $\{a_1, \dots, a_4\} \in F_1$, $\{a_5, \dots, a_8\} \in F_2$ et $\{a_9, \dots, a_{12}\} \in F_3$. Pour des raisons de lisibilité, seules certaines faces et arêtes sont mises en évidence. La propriété (1) est ainsi respectée à travers les arêtes $\{a_1, a_4\} \in F_1, \{a_5, a_6\} \in F_2$ et $\{a_9, a_{10}\} \in F_3$, avec $a_1 = a_5$, $a_4 = a_{10}$ et $a_6 = a_9$. La représentation des brins orientés donnée dans la figure 53c permet de vérifier la propriété (2) au niveau des arêtes confondues. Nous constatons par exemple que les orientations O_1 et O_5 des brins b_1 et b_5 sont opposées, de même que O_4 et O_{10} et pour O_6 et O_9 . Cette orientation opposée est une conséquence de la précondition (PC3) sur les données d'entrée concernant l'orientation globale cohérente des faces du modèle. Les deux propriétés étant avérées, nous procédons ainsi à la liaison par β_2 de F_1 et F_2 via leurs 1-cellules a_1 et a_5 , de F_2 et F_3 via a_6 et a_9 et F_1 et de F_3 via a_4 et a_{10} . Cette liaison se fait à l'aide de l'opération de 2-couture à l'issue de laquelle $\beta_2(b_1) = b_5$ et $\beta_2(b_5) = b_1$ (similairement, $\beta_2(b_4) = b_{10}$, $\beta_2(b_{10}) = b_4$, $\beta_2(b_6) = b_9$ et $\beta_2(b_9) = b_6$). Ces opérations appliquées à toutes les 2-cellules résultent sur la 3-cellule fermée illustrée par la figure 53d.

Cas Complexes de 2-couture

Les propriétés (1) et (2) suffisent pour reconstruire un volume simple et isolé, mais ne suffisent pas dans des configurations incluant plusieurs volumes adjacents. En effet, la propriété qui implique que deux 2-cellules partageant une même arête appartiennent à la même 3-cellule n'est valable que lorsqu'il n'y a que deux faces autour de l'arête concernée. Au niveau des croisements entre plusieurs volumes, il y a forcément plus de deux faces qui partagent une même arête commune. Dans ce cas, contrairement à l'étape précédente (reconstruction de 2-cellules isolées à partir des données d'entrée), l'information indiquant quelles sont les 2-cellules qui doivent être liées par β_2 doit être retrouvée.

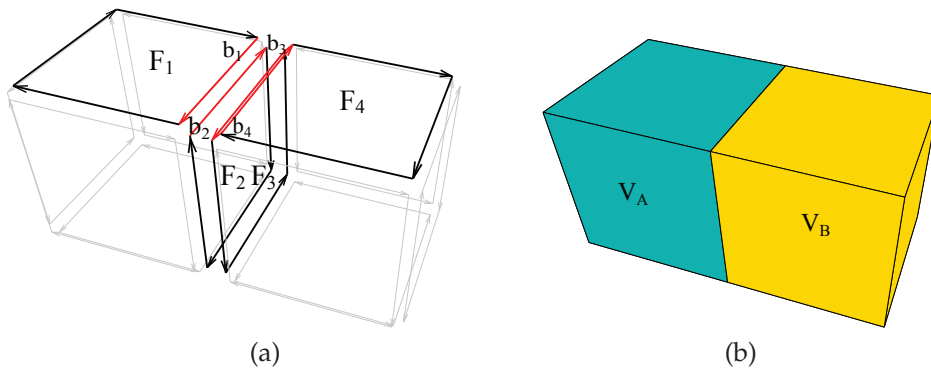


FIGURE 54 – (a) Représentation par une 3-carte de deux cubes adjacents avec mise en évidence des 2-cellules F_1 à F_4 qui partagent une arête commune. (b) Résultat escompté après une bonne reconstruction.

La figure 54 illustre ce type de configuration, ici avec deux volumes adjacents. Au niveau de leur zone de contact, nous retrouvons deux faces F_2 et F_3 qui sont confondues dans l'espace et qui ont toutes leurs arêtes partagées par quatre faces (cf. figure 54a). La vue éclatée permet de mettre en évidence toutes les faces autour de l'arête supérieure (en rouge) communes aux 2-cellules F_1, F_2, F_3 et F_4 . En effet, la géométrie des quatre arêtes associées aux brins b_1, b_2, b_3 et b_4 est la même. Si nous prenons l'exemple de F_1 , en respectant les propriétés (1) et (2), il est possible de la 2-coudre avec F_2 et F_4 . Cependant seule l'une des deux options est la bonne, à savoir celle qui va permettre d'obtenir deux volumes distincts (cf. figure 54b).

Afin de montrer la différence entre ces deux choix, une vue 2D des cubes de la figure 54 est proposée dans la figure 55. Ainsi, si le choix est fait de 2-coudre F_1 à F_4 tel que $\beta_2(b_1) = b_4$ et réciproquement, $\beta_2(b_4) = b_1$, alors il ne reste que F_3 comme option de 2-couture pour F_2 autour de leur arête commune. En considérant B_C l'ensemble des brins décrivant le modèle tel que $b_1, b_2, b_3, b_4 \in B_C$, il en résulte donc un volume unique $V = \langle \beta_1, \beta_2 \rangle(d)$ avec $d \in B_C$. Par ailleurs la surface de V se touche au niveau de F_2 et F_3 (cf. figure 55b). Alors que si F_2

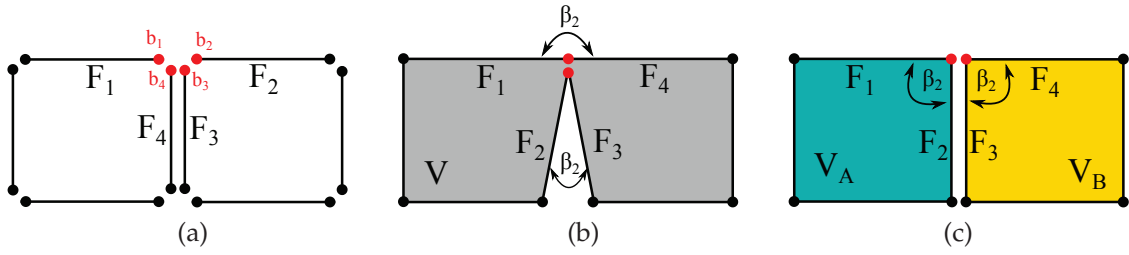


FIGURE 55 – (a) Configuration initiale avec les faces non connectées (correspond à la figure 54a). (b) Résultat obtenu lorsque F_1 est 2-cousue avec F_4 et F_3 avec F_2 . (c) Résultat obtenu lorsque F_1 est 2-cousue avec F_2 et F_3 avec F_4 (correspond à la figure 54b).

est choisie à la place de F_4 pour être 2-cousue avec F_1 , nous obtenons bien deux volumes V_A et V_B (cf. figure 55c), décrits par les ensembles de brins $B_A, B_B \subset B_C$ tel que $B_C = B_A \cup B_B$. V_A et V_B forment alors deux volumes distincts $\langle \beta_1, \beta_2 \rangle(b_1)$ et $\langle \beta_1, \beta_2 \rangle(b_3)$, avec $b_1, b_2 \in B_A$ et $b_3, b_4 \in B_B$, ce qui correspond au résultat es-compté. Le problème de la première solution est qu'elle crée une incohérence entre la géométrie et la topologie, car des arêtes qui ont la même géométrie sont alors représentées par plusieurs arêtes dans la topologie.

Il est donc important d'être en mesure de sélectionner de manière pertinente quelles sont les 2-cellules à lier entre elles, parmi celles qui ont une arête commune, afin de produire une reconstruction correcte des volumes. Pour cela, nous ajoutons une troisième propriété qui définit une règle permettant de trier les faces autour de l'arête : (3) lorsque plus de deux faces partagent la même arête, une face est liée par β_2 avec la face la plus proche d'elle angulairement, dans le sens antihoraire autour de l'arête. Ainsi, grâce à la combinaison de ces trois propriétés, nous pouvons reconstruire tous les liens β_2 entre les faces isolées. Nous présentons dans la sous-section suivante la méthode développée pour assurer la mise en oeuvre des opérations de 2-couture.

2-couture par la Méthode du Tri Angulaire

Afin de prendre en compte les propriétés (1), (2) et (3), nous définissons une méthode basée sur un tri angulaire. Les angles qui séparent les faces autour d'une arête commune sont calculés et utilisés pour définir un ordre des brins de chaque 2-cellule à 2-coudre. La méthode de tri est constituée de trois étapes. Pour chaque arête géométrique du modèle, nous procédons au :

- Regroupement des 2-cellules ayant cette arête en commun, en choisissant l'une d'elle comme référence ;
- Calcul des angles entre la 2-cellule de référence et celles autour de l'arête commune, et tri des 2-cellules par valeurs des angles ;

- 2-couture de chaque brin d'une position angulaire donnée (de même orientation que le brin de référence) avec le brin d'orientation opposée à la position angulaire suivante, dans le sens antihoraire.

Le calcul des angles s'effectue sur le plan perpendiculaire au brin de référence et contenant le vecteur normal de la face de référence. Soit F_R la face de référence du tri angulaire, \vec{N}_{F_R} son vecteur normal et \vec{v}_1 le vecteur correspondant à l'arête orientée associée au brin de référence $d \subset F_R$. Les angles qui séparent les faces autour de l'arête commune sont calculés sur les projections des faces sur le plan $(P_{ang}) = (\vec{N}_{F_R}, \vec{N}_{F_R} \otimes \vec{v}_1)$. En d'autres termes, il s'agit du plan dont la normale pointe vers l'extérieur (vers le lecteur). Le respect de cette condition est nécessaire pour une cohérence du sens antihoraire du tri angulaire indépendamment de la référence choisie.

La figure 56 illustre le principe sur trois volumes cubiques V_A, V_B et V_C représentés en vue éclatée. Dans cet exemple, l'attention est portée sur l'arête incidente aux six faces F_1, \dots, F_6 . Par ailleurs la représentation en 3-carte permet de montrer les orientations des différentes arêtes et faces. La première étape consiste à identifier toutes les 2-cellules concernées par le tri à savoir les faces F_1, \dots, F_6 dont les arêtes respectives a_1, \dots, a_6 (correspondant respectivement aux brins b_1, \dots, b_6) sont confondues dans l'espace. F_1 est choisie comme référence pour l'application du tri angulaire. Ensuite le calcul des angles entre F_1 et les autres faces permet de classer les 2-cellules F_2 et F_3 à l'angle 90° , F_4 et F_5 à l'angle 180° et enfin F_6 à l'angle 270° . La face de référence F_1 est quant à elle classée à l'angle 0° .

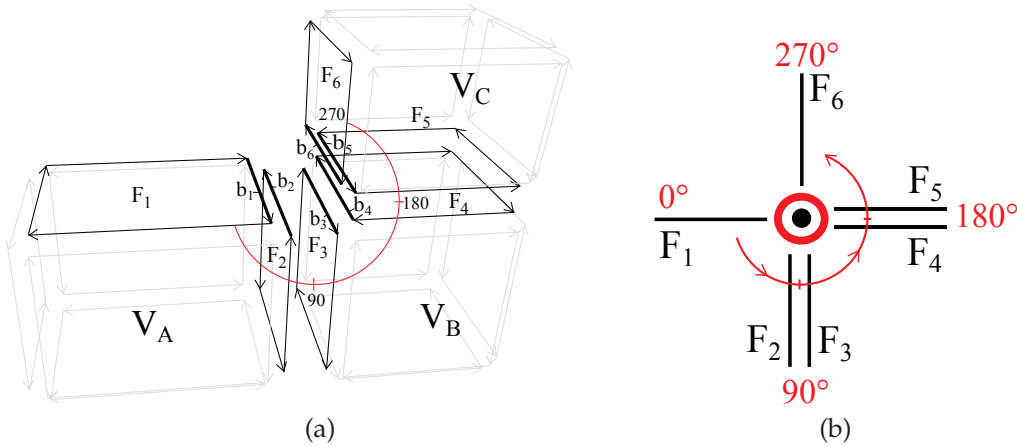


FIGURE 56 – (a) Représentation de trois volumes V_A, V_B et V_C . Les six faces en traits foncés partagent une même arête (décrite par les 6 brins dessinés en gras et numérotés de b_1 à b_6). (b) Positions angulaires des faces autour de l'arête commune projetées sur le plan perpendiculaire à l'arête. Le rond rouge contenant le point noir symbolise que l'arête pointe vers l'extérieur. Le brin b_1 de la face F_1 est la référence.

	0°	90°	180°	270°
O_1	b_1	b_3	b_5	\emptyset
O_2	\emptyset	b_2	b_4	b_6

TABLE 1 – Tableau de tri des brins des faces identifiées de la figure 56 autour de leur arête commune. O_1 représente la ligne des brins ayant la même orientation que celle de la face référence b_1 , O_2 les brins d’orientations opposées à b_1 . \emptyset correspond à une configuration d’angle et d’orientation donnée à laquelle aucun brin ne correspond.

Une fois les angles entre les faces déterminés, nous sommes en mesure de construire un tableau descriptif de la configuration de toutes les faces autour de l’arête partagée comme l’illustre le tableau 1. Ce dernier permet de distinguer les arêtes en fonction de leur position angulaire ainsi que de leur orientation. La vue présentée par la figure 56a donne une position adéquate pour le cas d’un brin de référence qui pointe vers l’extérieur. Les opérations de 2-coutures peuvent alors s’exécuter de manière itérative en prenant chaque brin d’orientation O_1 avec une position angulaire donnée puis en le liant par β_2 au brin d’orientation O_2 situé à la position angulaire suivante. C’est ainsi que les 2-cellules $F_3(90^\circ)$ et $F_4(180^\circ)$ vont être 2-cousues via leur brins respectifs b_3 et b_4 tel que $\beta_2(b_3) = b_4$ et inversement. Il en va de même pour $F_5(180^\circ)$ et $F_6(270^\circ)$ via les brins b_5 et b_6 tel que $\beta_2(b_5) = b_6$ et inversement. Le brin b_1 de $F_1(0^\circ)$ se retrouve 2-cousue à $b_2(90^\circ)$, complétant ainsi le processus de 2-couture des faces autour de l’arête commune. Une correspondance adéquate est définie pour toutes les 2-cellules impliquées, ne laissant aucune d’elles avec un brin 2-libre. Il en résulte une bonne subdivision en 3-cellules de l’espace avec les faces F_1 et F_2 affectées au volume V_A , les faces F_3 et F_4 à V_B et enfin F_5 et F_6 à V_C (cf. figure 56).

	0°	90°	180°	270°
O_1	b_4	b_2	\emptyset	b_6
O_2	b_5	b_3	b_1	\emptyset

TABLE 2 – Tableau de tri dans le cas où b_4 est la référence et le calcul des angles effectué sur la plan ayant une normale pointant à la même direction que b_4 .

L’opération de tri fonctionne indépendamment du brin de départ, tant que le tri angulaire est effectué sur le plan ayant sa normale dans sens du brin de référence. Par exemple si F_4 est choisie comme face de référence, impliquant que b_4 est le brin de départ, en se basant directement sur la vue donnée par la figure 56a, nous pouvons constater que b_4 pointe vers l’intérieur. Par conséquent un calcul des angles directement sur ce plan implique un tri angulaire dans le sens horaire, comme l’illustre la figure 57a. Le calcul dans le bon sens revient à faire

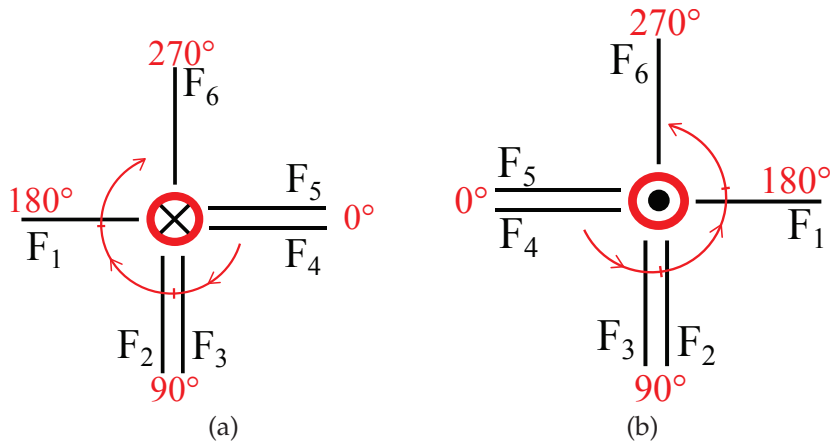


FIGURE 57 – Positions angulaires des faces autour de l'arête commune projetées sur le plan perpendiculaire à l'arête. (a) Le brin de référence pointe vers l'intérieur (symbolisé par un rond rouge contenant une croix noire). (b) Le brin de référence pointe vers l'extérieur.

une rotation de 180° par rapport à la verticale pour avoir le brin de référence qui pointe vers l'extérieur (cf. figure 57b). Le tableau qui en résulte permet de procéder aux 2-coutures des brins dans le sens antihoraire (cf. tableau 2). Nous retrouvons alors les mêmes 2-couture que pour le cas où F_1 est la face référence, avec $\beta_2(b_4) = b_3$ et $\beta_2(b_2) = b_1$. Le tableau est considéré comme circulaire, par conséquent arrivé à la dernière colonne d'angle et qu'il y a toujours un brin 2-libre, ce dernier doit être 2-cousu avec son brin correspondant de la première colonne. C'est le cas de b_6 et b_5 qui vont être 2-cousus tel que $\beta_2(b_6) = b_5$.

Si l'objet dont la reconstruction des liens β_2 doit être effectuée possède des bords (comme l'exemple de la figure 56a), il y a deux cases du tableau de tri angulaire qui ne comportent pas de brins (\emptyset). Il s'agit là des brins qu'il faudrait créer pour fermer l'objet à l'aide d'une nouvelle surface. Par contre, dans le cas où l'objet est sans bord, toutes les cases du tableau seront remplies et le processus fonctionnera de manière identique au cas à bord.

Par ailleurs, le processus de tri angulaire dépend de la conformité du modèle à la précondition (P3) définie dans la section 3.1.1. En effet cette dernière permet de garantir la parité entre le nombre de brins d'orientation opposée autour d'une arête, condition nécessaire à une bonne subdivision spatiale. Un nombre différent des 2-cellules à brins orientés O_1 par rapport aux 2-cellules à brins orientés O_2 signifierait qu'un ou plusieurs brins ne trouveront aucune correspondance dans le tableau de tri, à l'issue du processus. Si par exemple, dans la figure 56b les brins des faces F_2 et F_3 avaient la même orientation, il serait impossible de fermer le volume V_A ou V_B . Par conséquent il en résulterait des 2-cellules pré-

sentant des arêtes 2-libres ou alors des faces pendantes donnant naissances à des 3-cellules non fermées ou mal décrites.

3.4.2 Reconstitution des liens entre les 3-cellules

À ce niveau du processus, nous considérons que l'étape précédente s'est bien déroulée et que le modèle est subdivisé en plusieurs volumes cohérents. La reconstruction des liens entre les faces a résulté sur $C_N = (B_N, \beta_1, \beta_2, \beta_3 = \emptyset)$ ne contenant que des 3-cellules fermées, c'est à dire $\forall b \in B_N, \beta_1(b) \neq \emptyset, \beta_2(b) \neq \emptyset$ et $\beta_3(b) = \emptyset$.

La dernière étape de notre reconstruction topologique consiste à connecter par β_3 ces différents volumes qui n'ont pour le moment aucun liens topologiques explicites. L'objectif est d'obtenir un EBM-LCC dont toutes les i -cellules qui la composent sont totalement connectées à d'autres i -cellules par β_i . En effet, seul un EBM-LCC formant une composante connexe unique va permettre d'atteindre toutes les cellules du modèle à partir de n'importe quelle autre cellule. C'est sur ce type de parcours des éléments du bâtiment, utilisant leurs relations topologiques, que reposent l'extraction d'informations requises par des applications de simulation par exemple.

Conditions à Remplir pour une Opération de 3-couture

Similairement à l'opération de 2-couture, la 3-couture dans une 3-carte est soumise à des conditions pour pouvoir être exécutée. En effet, deux 3-cellules peuvent être 3-cousues à travers deux de leurs 2-cellules si : (1) les deux 2-cellules en question ont la même géométrie et la même topologie (à savoir deux faces géométriquement identiques) et de plus (2) ces deux 2-cellules ont des orientations opposées.

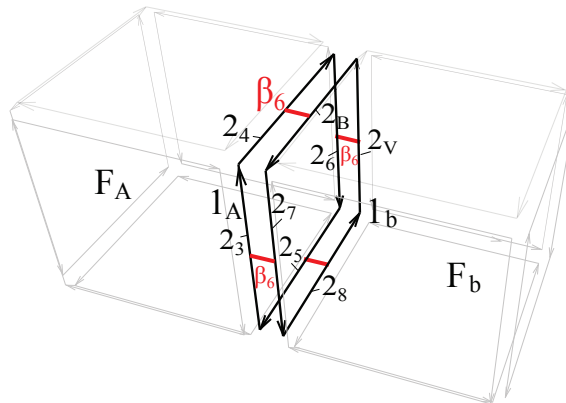


FIGURE 58 – Deux volumes V_A et V_B liés par β_3 (traits rouges) via leurs 2-cellules F_A et F_B .

Ces deux conditions sont vérifiées entre les deux volumes de la figure 58 permettant ainsi de les lier par β_3 . En effet, entre $F_A \in V_A$ défini par l'ensemble des brins $B_A = (b_1, b_2, b_3, b_4)$ et $F_B \in V_B$ défini par $B_B = (b_5, b_6, b_7, b_8)$, il existe une fonction bijective f tel que $\forall b_a \in B_A$, il existe un $b_b \in B_B$ tel que $f(b_a) = b_b$ et $f(\beta_1(b_a)) = \beta_0(b_b)$. Ainsi f permet d'établir une correspondance de brin à brin d'une 3-cellule à l'autre pour permettre de vérifier la possibilité de l'opération de 3-couture (cf. Définition 6). De part cette bijection, $f(b_a) = b_b$ et $f(\beta_1(b_a)) = \beta_0(b_b)$ implique que les sommets associés à b_a et à $\beta_1(b_b)$ ont la même géométrie et donc que les arêtes associées à b_a et à b_b sont confondues. Nous avons alors, après exécution de la 3-couture, $\beta_3(b_1) = b_5$, $\beta_3(b_2) = b_8$, $\beta_3(b_3) = b_7$ et $\beta_3(b_4) = b_6$ (et réciproquement).

Pour être en mesure de lier deux volumes par β_3 , il faut que ces derniers aient au moins une face commune qui représente leur surface de contact. De ce fait, les volumes qui ne se touchent pas, se touchent uniquement en un point ou le long d'une arête ne peuvent pas être 3-cousus. Dans le cas de deux 3-cellules adjacentes ne présentant pas de faces géométriquement identiques à leur zone de contact, les 2-cellules démarquant cette zone doivent être créées sur les deux volumes concernées afin de fournir à la 3-carte la configuration requise pour procéder aux opérations de 3-couture.

La figure 59 illustre tous les cas de figures possibles entre deux volumes distincts. Dans les trois premiers cas il n'y a pas de surface commune entre V_A et V_B (cf. figure 59a, 59b et 59c), il n'y a donc pas de lien β_3 à créer. Lorsqu'il y a adjacence entre F_A et F_B , la surface de contact n'est pas nécessairement une (ou plusieurs) face(s) qui existe(nt) déjà, comme c'est le cas de la figure 59d dans laquelle il n'y a pas de 2-cellule décrivant cette zone dans le EBM-LCC. De ce fait, pour que l'opération de 3-couture puisse s'effectuer entre V_A et V_B , il faut créer une face sur les deux 3-cellules en découpant convenablement F_A et F_B selon la zone de contact. Nous allons alors obtenir deux faces F_{CA} (F_C du côté de V_A) et F_{CB} (du côté de V_B) qui auront une géométrie identique mais une orientation opposée. V_A et V_B deviendront ainsi compatibles à la 3-couture à travers F_{CA} et F_{CB} . Dans le cas où F_A et F_B sont exactement confondues dans l'espace (cf. figure 59e), aucune découpe de face n'est nécessaire et la couture est directement possible, sous condition que les deux faces soient orientées de manière opposée.

Nous procédons dans un premier temps à la détection de toutes les surfaces de contact entre chaque paire de volumes que comporte C_N . Si le modèle est convenable et que les étapes précédentes se sont bien déroulées, pour toute paire de 2-cellules $\{F_i, F_j\} \in C_N$, si F_i et F_j sont superposées, alors $F_i \in V_a$, $F_j \in V_b$ et $V_a \neq V_b$. De ce fait, toute paire de 2-cellules superposées rencontrée dans C_N représente une surface de contact entre deux volumes distincts contenant respectivement les 2-cellules de la paire.

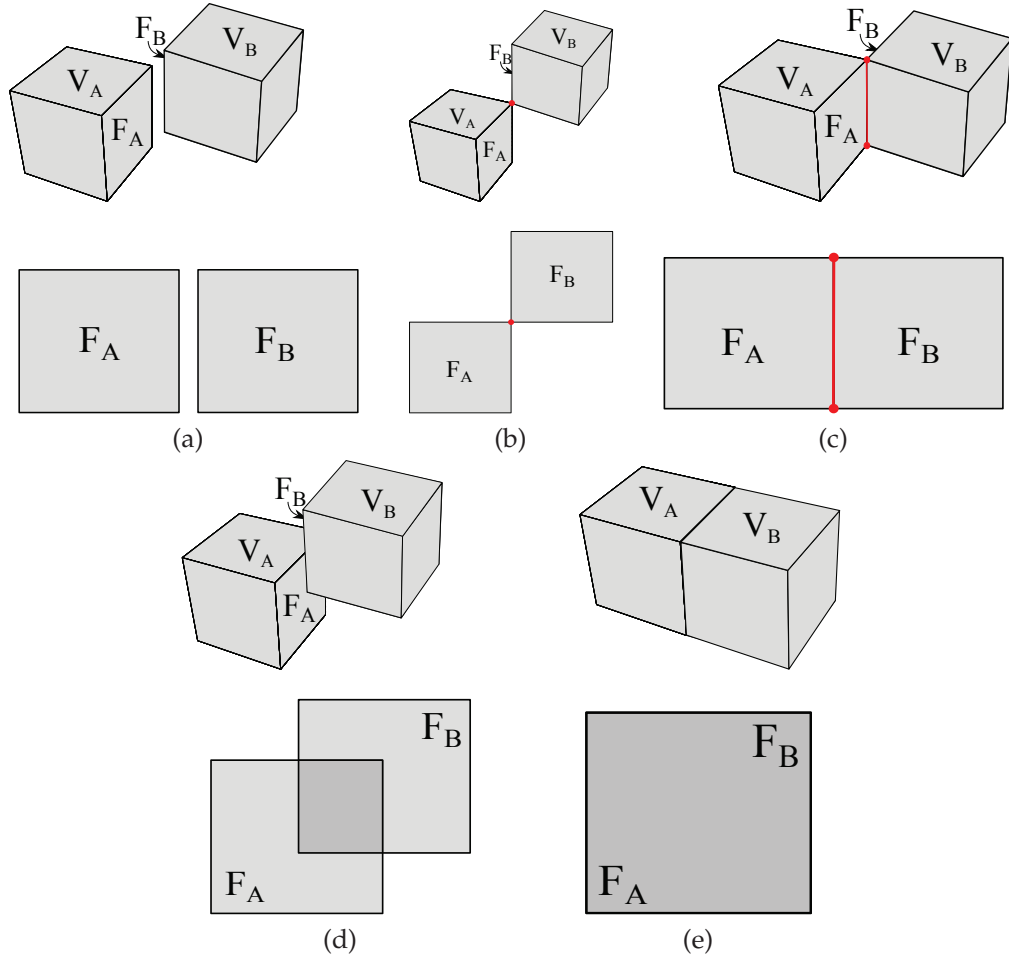


FIGURE 59 – Configurations possibles pour deux volumes V_A et V_B au niveau de leur faces coplanaires respectives F_A et F_B (non visible); la projection 2D des faces sur leur plan de contact est représentée en dessous de chaque modèle 3D. (a) F_A et F_B ne se touchent pas. (b) F_A et F_B se touchent en un point. (c) F_A et F_B ne partagent qu’une arête. (d) F_A et F_B sont partiellement superposées. (e) F_A et F_B sont totalement confondues dans l’espace.

Processus de Création des Liens β_3 entre les 3-cellules

Le processus de connexion des 3-cellules commence par la collecte de toutes les faces coplanaires du modèle. Les 2-cellules de C_N sont parcourues une par une, et chacune d’elle est comparée à toutes les autres 2-cellules non encore traitées afin de déterminer celles qui lui sont coplanaires. Deux faces sont ainsi considérées coplanaires si elles respectent les conditions de coplanarité définies à la section 3.3.5. Pour chaque 2-cellule $F \in C_N$, $\forall F' \in C_N$ tel que F et F' sont coplanaires, alors F et F' sont classées dans le même groupe. F' est ensuite exclue de l’algorithme de recherche. La complexité algorithmique d’une telle approche est d’ordre $O(n^2)$. Il est possible d’optimiser la méthode, notamment en regroupant les 2-cellules en fonction de leur parallélisme avec les plans formés par les

axes x,y,z du repère cartésien, puis en comparant leur distance respective à ces plans. Cependant cela implique l'hypothèse de bâtiments de type "Manhattan World" [39] à savoir des constructions dont les composants sont alignés par rapport aux axes x,y,z . Cette hypothèse peut s'avérer contraignante, surtout dans le cas de modèles de villes virtuelles par exemple.

Nous nous retrouvons ainsi avec plusieurs groupes de faces coplanaires. Il s'agit maintenant de trouver dans chaque groupe les paires de faces qui présentent uniquement une intersection non nulle. Puis pour chaque paire $\{F_i, F_j\}$, les deux cas de superposition sont explorés : soit F_i et F_j ont la même topologie et la même géométrie (cas de la figure 59e), ce qui veut dire qu'il existe une correspondance de brin à brin entre F_i et F_j , soit elles ont des formes différentes (cas de la figure 59d).

Dans le premier cas, l'opération de 3-couture est directement appliquée entre les deux 3-cellules V_a et V_b , contenant respectivement F_i et F_j . Dans le second cas, nous devons procéder à la création de la surface de contact entre les deux volumes adjacents en découpant F_i et F_j de manière à obtenir F'_i et F''_i tel que $F_i = F'_i \cup F''_i$, puis F'_j et F''_j tel que $F_j = F'_j \cup F''_j$, avec F''_i et F''_j identiques. L'opération de 3-couture entre V_a et V_b deviendra ainsi possible via F''_i et F''_j . Nous présentons le processus de la découpe des faces dans la sous section suivante.

Découpe des 2-cellules pour la Création des Zones de Contact

Pour procéder à la découpe des 2-cellules, l'approche que nous avons adoptée consiste à insérer successivement, sur les faces à découper, les primitives de la (ou des) nouvelle(s) face(s) à créer, à savoir les 0-cellules et 1-cellules qui lorsqu'elles sont convenablement reliées permettent de retrouver la surface de contact. Nous nous aidons pour cela des opérations d'insertion de cellules définies pour les 3-cartes, grâce auxquelles les découpes se font tout en respectant les orientations des brins et résultent sur une 3-carte valide (cf. section 2.5.4). Pour chaque groupe de 2-cellules coplanaires, le procédé de découpe des faces est constitué des étapes suivantes :

- Calcul et insertion dans le EBM-LCC des points d'intersection entre les arêtes des faces ;
- Détection des points *internes* et insertion des arêtes qui les lient aux frontières des faces qui les contiennent ;
- Insertion des arêtes manquantes pour compléter la découpe des surfaces de contact.

L'insertion des arêtes décrivant la frontière de la surface de contact entre deux faces superposées se fait en suivant les cycles d'arêtes de ces faces. En effet pour deux faces superposées F_i et F_j , lorsque nous procédons à l'insertion des arêtes

formant la surface de contact sur F_i (resp. F_j), nous nous référons aux arêtes de F_j se trouvant également à la zone de contact, puis nous insérons leurs arêtes équivalentes sur F_i (resp. F_j) en suivant le cycle décrit par F_j (resp. F_i). Nous allons par la suite détailler les trois étapes de la découpe et les illustrer à travers des exemples.

PREMIÈRE ÉTAPE : Vu que toutes les faces du groupe sont coplanaires, elles sont orthogonalement projetées sur le plan 3D qui les contient, afin de simplifier les calculs en travaillant par la suite en 2D. Un algorithme de *sweep line* est ensuite utilisé pour détecter toutes les intersections présentées par les arêtes des différentes faces. Il en résulte alors une liste $L_{p_{2D}}$ de points 2D constituant l'ensemble des points d'intersection détectés. Ensuite pour chaque arête de chaque face, nous recherchons quels sont les points de $L_{p_{2D}}$ qui s'intersectent avec cette dernière. À chaque intersection détectée entre un segment et un point, une 0-cellule correspondante au point est insérée dans la 1-cellule correspondant au segment. Cette insertion se traduit par la création de deux nouveaux brins dans la 3-carte, auxquels la position du point (reprojeté sur le plan 3D de la face) est affectée en guise de 0-attributs.

La notion d'intersection entre deux segments 3D est très sujette aux problèmes de précision numérique. De plus, les faces que nous considérons coplanaires ne le sont pas nécessairement de manière exacte. De ce fait, nous n'insérons pas directement les projections 3D des points d'intersection 2D trouvés sur les arêtes du EBM-LCC. À la place, nous recherchons les point 3D qui se situent sur les arêtes en question et qui sont les plus proches des points d'intesections à insérer. Plus précisément, si nous considérons une 2-cellule $F \in C_N$ contenant le brin $b_1 \in B_N$ tel que la projection 2D de l'arête contenant b_1 contiennent p_{2D} . Une recherche du point le plus proche de p_{2D} , se situant sur $1\text{-cell}(b_1)_{2D}$ est effectuée et permet d'obtenir le point p'_{2D} . Si la distance $l_{pp'}$ séparant p_{2D} et p'_{2D} est telle que $l_{pp'} \simeq 0$, alors, nous procédons à une opération de 0-insertion d'une 0-cellule entraînant la création de b'_1 tel que $b'_1 \in B_N$, $0\text{-attr}(b'_1) = p'_{3D}$ et $\beta_1(b_1) = b'_1$, avec p'_{3D} la projection de p'_{2D} sur le plan 3D contenant F .

DEUXIÈME ÉTAPE : Dans cette étape il s'agit de détecter les 0-cellules internes, qui ne résultent pas des intersections entre arêtes. En effet, pour deux faces superposées, ces sommets se situent à la frontière de l'une et à l'intérieur de la surface de l'autre. Il n'est cependant pas possible dans une 3-carte d'insérer une 0-cellule isolée à l'intérieure d'une 2-cellule, sans qu'elle ne soit rattachée à une ou plusieurs arête de cette dernière. De ce fait, pour insérer les 0-cellules internes, il est nécessaire d'insérer des arêtes qui les lient à la frontière de la 2-cellule qui les contient. En pratique, pour chaque paire de faces superposées F_i et F_j , un test est effectué sur chaque point de F_j pour déterminer lesquels parmi eux se trouvent à l'intérieur de F_i . Il y a alors trois configurations de sommets

possibles pour F_i (en dehors de ses sommets d'origines) : (i) elle ne contient que des nouveaux sommets issus des intersections entre arêtes, donc aucun point interne ; (ii) elle contient des sommets issus des intersections et des sommets internes ; (iii) elle ne contient que des sommets internes.

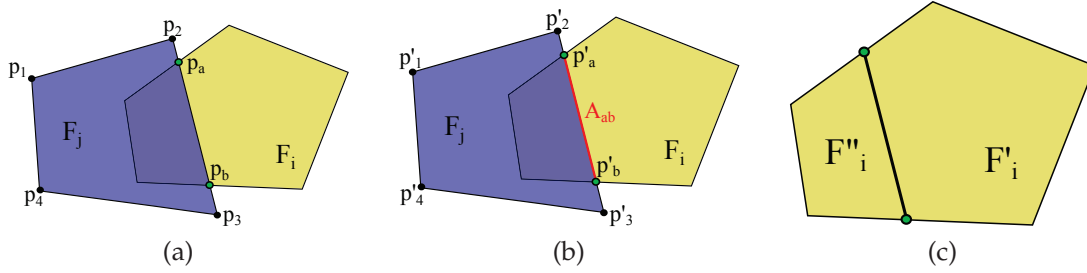


FIGURE 60 – Cas de figure (i). (a) F_i et F_j ont uniquement deux points d'intersection p_a et p_b . (b) Insertion de l'arête A_{ab} entre p_a et p_b . (c) F_i coupée en deux faces F'_i et F''_i .

Dans le cas (i), tous les sommets à utiliser pour la découpe se situent déjà sur la frontière de F_i (cf. figure 60). Du fait qu'il n'y ait aucun sommet interne, il n'y a que deux points d'intersection entre les deux faces superposées. Par conséquent, une seule insertion d'arête est nécessaire pour procéder à la découpe qui donne leur face de contact. Par exemple dans la figure 60b, l'insertion de l'arête A_{ab} , reliant les deux points d'intersection p_a et p_b permet d'obtenir F'_i (cf figure 60c), qui correspond à la surface de contact entre F_i et F_j . Les insertions d'arêtes correspondant au cas (i) se font lors de la troisième étape du procédé de découpe.

Dans le cas (ii), pour n sommets internes détectés, nous procédons à l'insertion de $n + 1$ arêtes. En suivant le cycle de points de F_j , le premier point interne à F_i doit être lié au point qui le précède dans la séquence et qui correspond à un point d'intersection déjà présent à la frontière des deux faces. Cela constitue ainsi la première arête insérée dans F_i . Ensuite, les arêtes qui la suivent dans le cycle de F_j sont elles aussi insérées jusqu'à atteindre un autre point d'intersection à la frontière de F_i , reliant ainsi tous les points internes aux frontières. Cela découpe F_i en deux faces F'_i et F''_i , F'_i constituant la surface de contact avec F_j . À l'issue de tous les tests sur F_i , les mêmes opérations vont être effectuées sur F_j par rapport à F''_i .

La figure 61 permet d'illustrer le processus avec deux sommets internes détectés, résultant sur l'insertion de trois arêtes. La séquence de points de F_j est tel que $S_{F_j} = \{p'_1, p'_2, p'_a, p'_3, p'_4, p'_b, p'_5, p'_6\}$, et contient deux points d'intersection p'_a et p'_b (correspondant respectivement à $p_a, p_b \in F_i$) et deux points internes à F_i , p'_3 et p'_4 (cf. figure 61a). Ainsi en suivant le cycle de S_{F_j} le premier point interne rencontré est p'_3 et le point qui le précède est p'_a . Le couple de point permet donc d'insérer la première arête sur F_i , à savoir $A_{a3'}$ (cf. figure 61b). Toujours en suivant S_{F_j} , à la suite de p'_3 se trouve p'_4 , le second point interne. Une deuxième

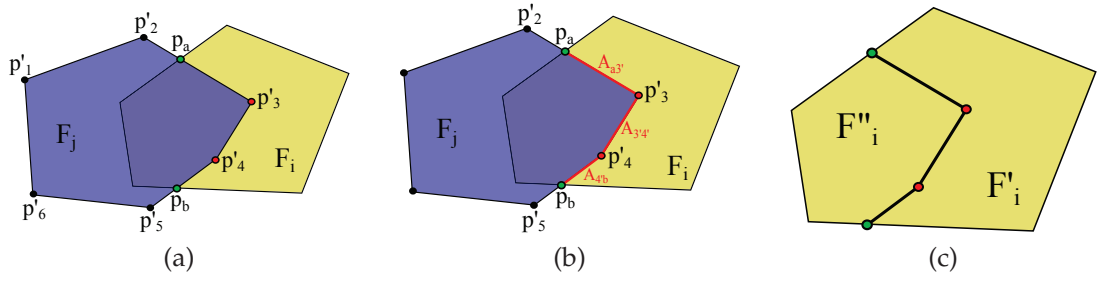


FIGURE 61 – Cas de figure (ii). (a) F_i et F_j ont deux points d'intersection p_a et p_b et F_i a deux points internes. (b) Insertion des arêtes $A_{a3'}$, $A_{3'4'}$ et $A_{4'b}$. (c) F_i coupée en deux faces F'_i et F''_i .

arête $A_{3'4'}$ est alors créée. Enfin, à la suite de p'_4 survient p'_b qui constitue le point final de la découpe de F_i , avec l'insertion de $A_{4'b}$ résultant sur la création de F'_i et F''_i (cf. figure 61c).

Enfin dans le cas (iii), comme illustrée par la figure 62, la découpe à faire sur F_i constitue un trou dans cette dernière. De ce fait il est nécessaire d'insérer une première arête permettant de joindre un des points internes à un des sommets à la frontière de F_i . Par exemple la première arête à être insérée dans l'exemple de la figure 62b est $A_{54'}$, reliant les sommets $p_5 \in F_i$ et $p'_4 \in F_j$. Ensuite la séquence d'arête de F_j est suivie, menant successivement à la création de $A_{4'1'}$, $A_{1'2'}$, $A_{2'3'}$ et $A_{3'4'}$. Nous obtenons alors une face à trou F'_i et la surface de contact F''_i , épousant la géométrie du trou (cf. figure 62c). La première arête créée n'appartenant pas à la surface de contact, elle n'est initialement présente sur aucune des deux faces superposées. Par ailleurs, puisque dans ce cas F_j est complètement contenue dans la surface de F_i , il est inutile de procéder à la recherche de points internes provenant de F_i sur elle. Les opérations utilisées sont ici aussi effectuées sur les projections 2D de F_i et F_j et les résultats sont reprojetés en 3D.

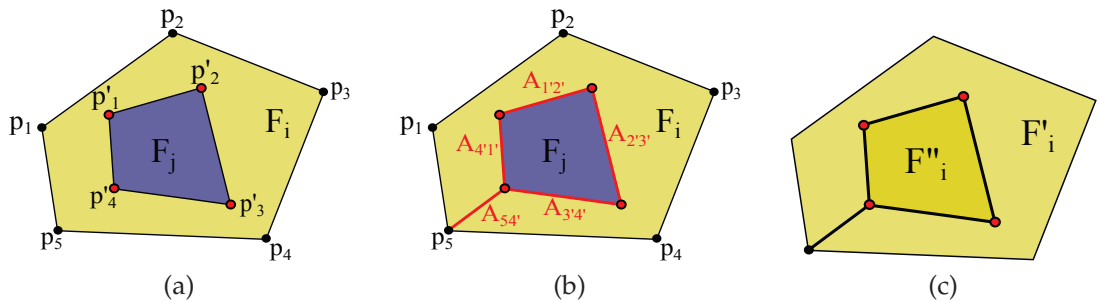


FIGURE 62 – Cas de figure (ii). (a) F_i et F_j ont deux points d'intersection p_a et p_b et F_i a deux points internes. (b) Insertion des arêtes $A_{a3'}$, $A_{3'4'}$ et $A_{4'b}$. (c) F_i coupée en deux faces F'_i et F''_i .

TROISIÈME ÉTAPE : La dernière étape consiste à insérer toutes les arêtes manquantes pour constituer toutes les surfaces de contact du modèle. En effet, jusque là seuls les cas comportant des sommets internes ont eu des découpes complètes. Il ne reste par conséquent que des faces correspondant au cas de figure (i). Cette étape aurait également pu être tenue directement après la première, mais cela impliquerait une augmentation considérable du nombre de faces coplanaires à comparer deux à deux pour procéder à la deuxième étape. Nous consacrons la sous section suivante à l'étude de plusieurs exemples de découpe, en utilisant des représentations en 3-carte, afin de mieux illustrer les conséquences de ces opérations sur le EBM-LCC.

Exemples de 3-coutures Nécessitant des Découpes de 2-cellules

Nous présentons dans cette sous section plusieurs illustrations des cas de figures possibles, impliquant une découpe de 2-cellule afin de rendre des opérations de 3-couture réalisables.

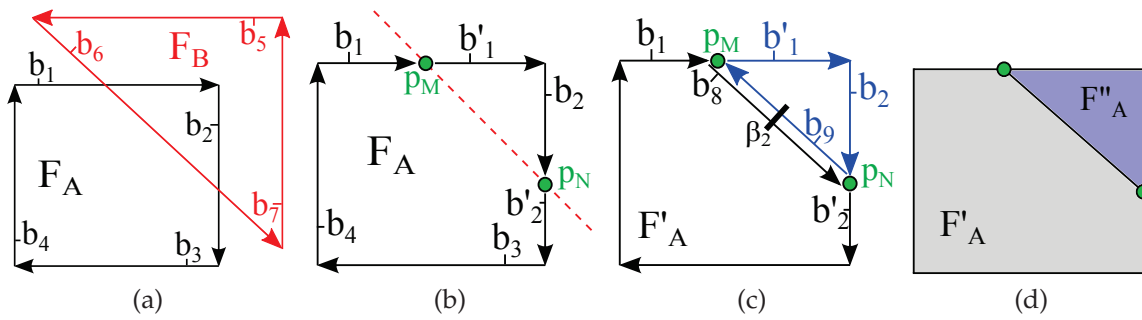


FIGURE 63 – (a) Les 2-cellules F_A (en noir) et F_B (en rouge) coplanaires et superposées, avec leur orientation respective. (b) Insertion des 0-cellules d'intersection p_M et p_N entre les arêtes. (c) Insertion de la nouvelle 1-cellule $[p_M p_N]$. (d) Nouvelles 2-cellules F'_A et F''_A résultantes de la découpe de F_A .

La figure 63 permet d'illustrer la configuration (i) avec deux faces superposées F_A et F_B . Nous nous intéressons uniquement à la découpe de F_A , celle de F_B correspondant à la configuration (ii) étudié dans l'exemple suivant. Dans la première étape, nous recherchons les intersections entre les arêtes de F_A et F_B . Ainsi l'intersection entre $1\text{-cell}(b_1) \in F_A$ et $1\text{-cell}(b_6) \in F_B$ permet la détection du point p_M , tandis que l'intersection entre $1\text{-cell}(b_2) \in F_A$ et $1\text{-cell}(b_7) \in F_B$ permet la détection de p_N . p_M et p_N sont ensuite insérées sur les deux paires d'arêtes ayant entraîné leur détection (cf. figure 63b). Les arêtes $1\text{-cell}(b_1)$ et $1\text{-cell}(b_2)$ se retrouvent divisées en deux et deux nouveaux brins b'_1 et b'_2 sont rajoutés à F_A tel que $0\text{-attr}(b'_1) = p_M$ et $\beta_1(b_1) = b'_1$ (similairement, $0\text{-attr}(b'_2) = p_N$ et $\beta_1(b_2) = b'_2$). Les opérations d'insertion étant simultanément appliquées à F_B et sachant que les deux intersections se sont faites avec $1\text{-cell}(b_6)$, les nouveaux brins insérés b'_6

et b_6'' sont tels que $0\text{-attr}(b_6') = p_M$ et $0\text{-attr}(b_6'') = p_N$. Enfin l'insertion d'une arête entre b_1' et b_2' divise directement F_A en deux parties distinctes : F'_A et F''_A qui correspond donc à la zone de contact avec F_B (cf. figure 63c et 63d).

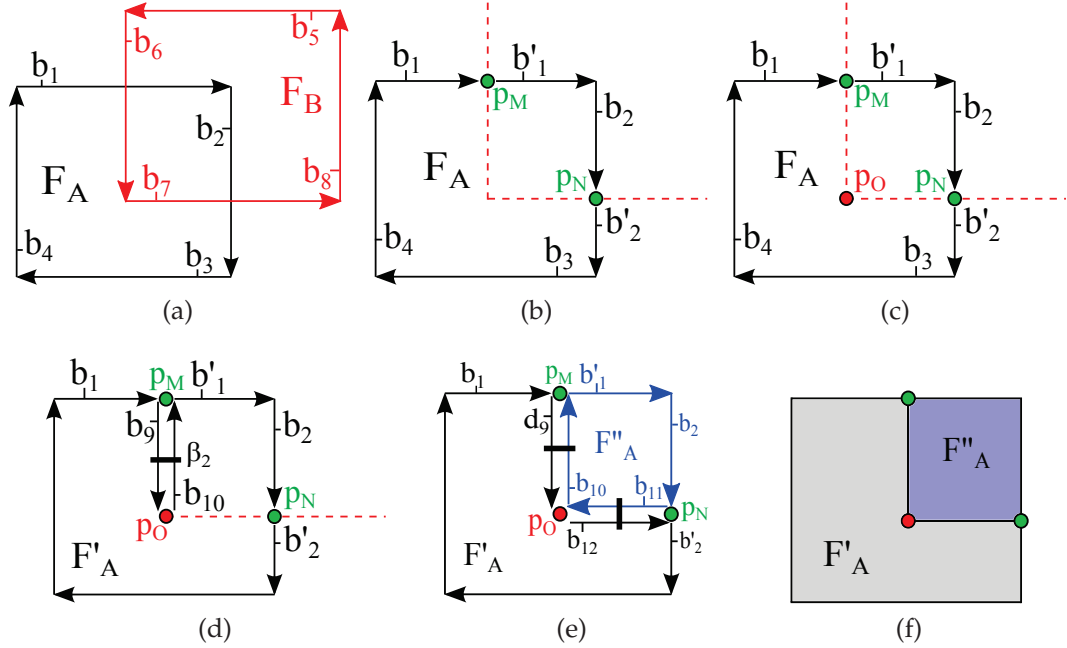


FIGURE 64 – (a) Les 2-cellules F_A (en noir) et F_B (en rouge) coplanaires et superposées, avec leur orientation respective. (b) Insertion des 0-cellules d'intersection p_M et p_N entre les arêtes. (c) Détection du point interne p_O . (d) et (e) Insertion des nouvelles 1-cellules $[p_M p_O]$ puis $[p_N p_O]$. (f) Nouvelles 2-cellules F'_A et F''_A résultantes de la découpe de F_A .

La figure 64a est un exemple du cas de figure (ii). La première ligne de la figure illustre les deux premières étapes de la découpe sur deux faces superposées F_A et F_B (correspondant au contact entre les deux cubes V_A et V_B de la figure 59d). La découpe de F_A est identique à celle de F_B . Les points p_M et p_N sont détectés grâce aux intersections entre les 1-cellules des couples de brins $\{b_1, b_6\}$ et $\{b_2, b_7\}$ (cf. figure 64a et 64b). Ensuite, le cas d'un point interne est illustré avec l'exemple du point p_O dans la figure 64c. Ce dernier correspond à une 0-cellule appartenant à F_B tel que $0\text{-attr}(b_7) = p_O$, mais n'ayant aucune correspondance directe avec F_A .

Les figures 64d et 64e permettent ensuite d'illustrer la dernière étape de la découpe. p_O étant l'unique point interne détecté, nous procédons à son rattachement à la frontière de F_A . p_M est le premier sommet choisi, mais ça aurait pu indifféremment être p_N , vu que ce sont les deux seules possibilités dans cet exemple. Nous créons alors deux nouveaux brins b_9 et b_{10} avec des orientations opposées dans C_N tels que $0\text{-attr}(b_9) = p_M$, $0\text{-attr}(b_{10}) = p_O$ et $\beta_2(b_9) = b_{10}$. La

découpe se poursuit par l'insertion de l'arête $[p_{OPN}]$ qui implique la création de deux brins supplémentaires b_{11} et b_{12} . Nous obtenons ainsi F_A'' , la face constituant la surface de contact entre F_A et F_B au niveau de F_A . F_A'' est décrite par l'ensemble de brins $B_A'' = (b_1', b_2, b_{11}, b_{10}) \in D$, avec $\beta_2(b_{10}) = b_9$ et $\beta_2(b_{11}) = b_{12}$. Une fois que F_B aura subi les mêmes transformations que F_A pour donner F_B' et F_B'' , V_A et V_B seront directement 3-cousus à travers F_A'' et F_B'' .

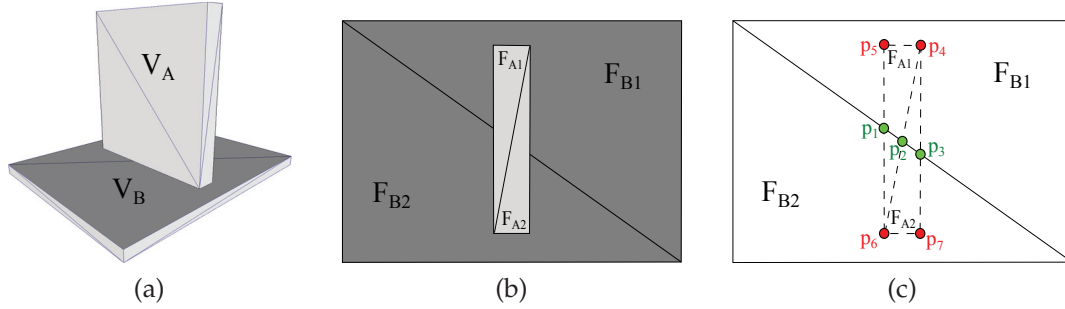


FIGURE 65 – (a) Un mur V_A sur un plancher V_B , avec toutes leurs faces triangulées. (b) Les faces à la surface de contact entre V_A et V_B . (c) Insertion des points d'intersections (verts) et détection des points internes (rouges).

La figure 65 permet d'illustrer un autre exemple du cas (ii), avec cette fois-ci plusieurs points internes impliqués. L'empreinte de V_A sur V_B est totalement contenue à l'intérieur de la surface formée par F_{B1} et F_{B2} . Le calcul des intersections entre les arêtes de F_{A1} , F_{A2} , F_{B1} et F_{B2} permet la détection des points d'intersection p_1, p_2 et p_3 (cf. figure 65c).

Nous nous intéressons ensuite à la création de la surface de contact entre F_{B1} et les 2-cellules de V_A (cf. figure 66). Les intersections entre F_{B1} et F_{A1} sont étudiées dans un premier temps, ce qui permet de retrouver les points internes p_4 et p_5 (cf. figure 66a) qui sont des points de F_{A1} . En se basant sur les arêtes de F_{A1} , nous insérons les 1-cellules correspondantes dans F_{B1} en commençant par une 0-cellule à la frontière de F_{B1} , à savoir p_1 . Puis le cycle de 1-cellules menant à l'obtention de la face F_{B1A} , commune aux deux faces (cf. figure 66b) est créé. Ainsi F_{B1} devient F_{B1}' (cf. figure 66c) à savoir une face découpée et dont tous les brins au niveau de la découpe sont liés par β_2 aux brins de F_{B1A} .

Enfin il s'agit de compléter la découpe en étudiant les intersections entre F_{B1}' et F_{A2} . Les sommets communs à ces dernières sont au nombre de trois, à savoir p_2, p_3 et p_4 . De ce fait, une seule arête reliant p_3 et p_4 est nécessaire pour former la nouvelle face F_{B2A} , sachant que les autres arêtes ($[p_4p_2]$ et $[p_2p_3]$) formant sa frontière sont déjà présentes. La 1-cellule est ainsi insérée pour donner naissance à F_{B2A} dans C_N (cf. figure 66e). Par conséquent, F_{B1}' devient F_{B1}'' , une 2-cellule découpée (cf. figure 66h) et liée par β_2 aux nouvelles 2-cellules créées

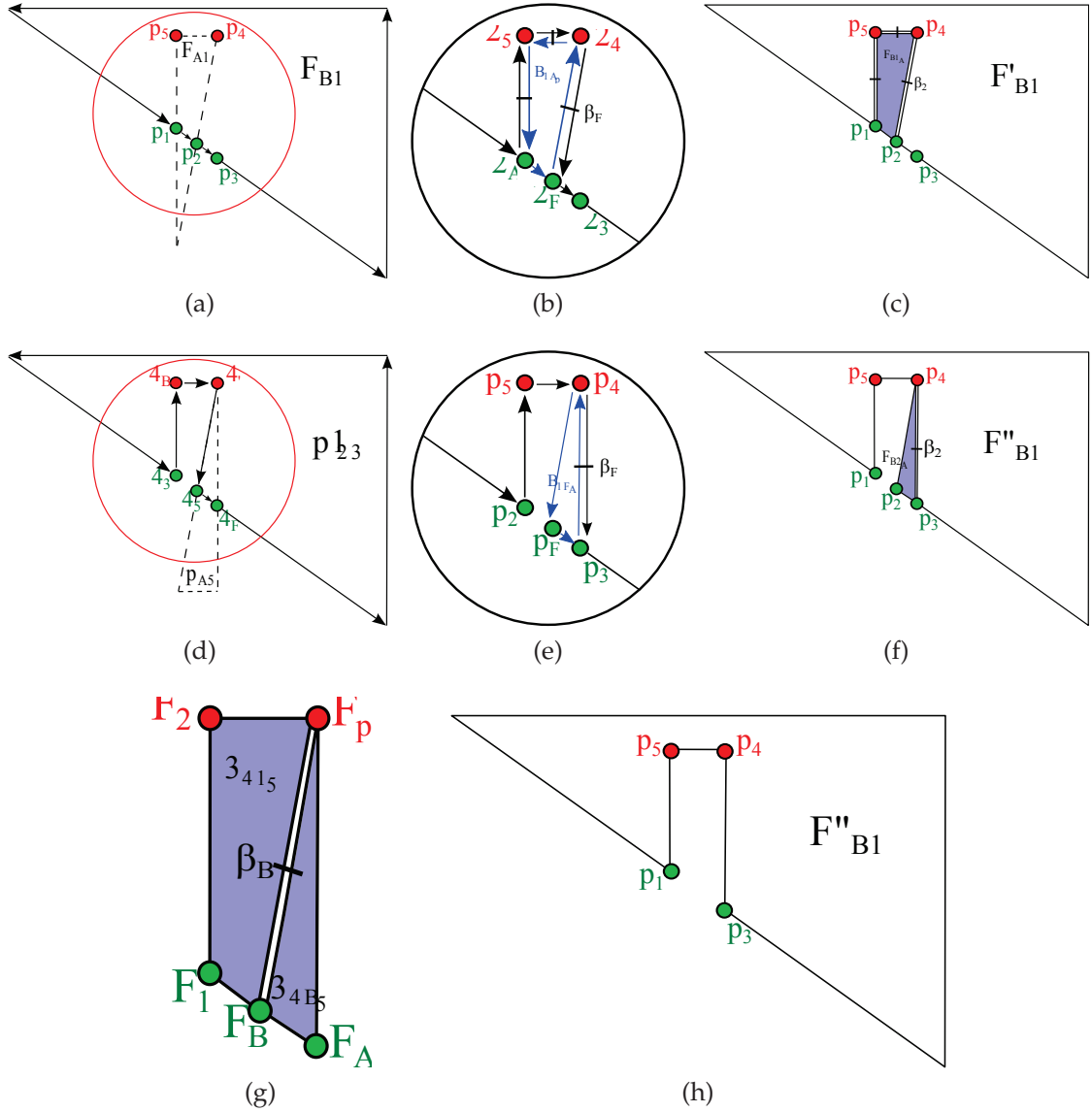


FIGURE 66 – (a) Intersection entre F_{B1} et F_{A1} ; détection des points internes p_4 et p_5 . (b) Création des nouvelles 1-cellules entre les points à la frontière de F_{B1} et les points internes. (c) Création de F_{B1A} (bleue) et obtention de F'_{B1} . (d) Intersection entre F'_{B1} et F_{A2} . (e) Insertion de la nouvelle 1-cellules entre p_3 et p_4 . (f) Création de F_{B2A} (bleue) et obtention de F''_{B1} . (g) et (h) Les trois 2-cellules résultantes de la découpe. F_{B1A} et F_{B2A} sont les deux zones de contact entre V_A et V_B .

(cf. figure 66g) à travers leur 1-cellules communes. Le même processus appliqué entre F_{B2} et les faces de V_A permettra d'obtenir F'_{A1B} et F'_{A2B} , les équivalents de F'_{B1A} et F'_{B2A} . Ces quatre nouvelles faces représentent ainsi les 2-cellules de V_B géométriquement et topologiquement identiques à celles de V_A à leur surface de contact. L'opération de 3-couture entre les deux volumes à travers ces faces permettra alors de les lier par β_3 .

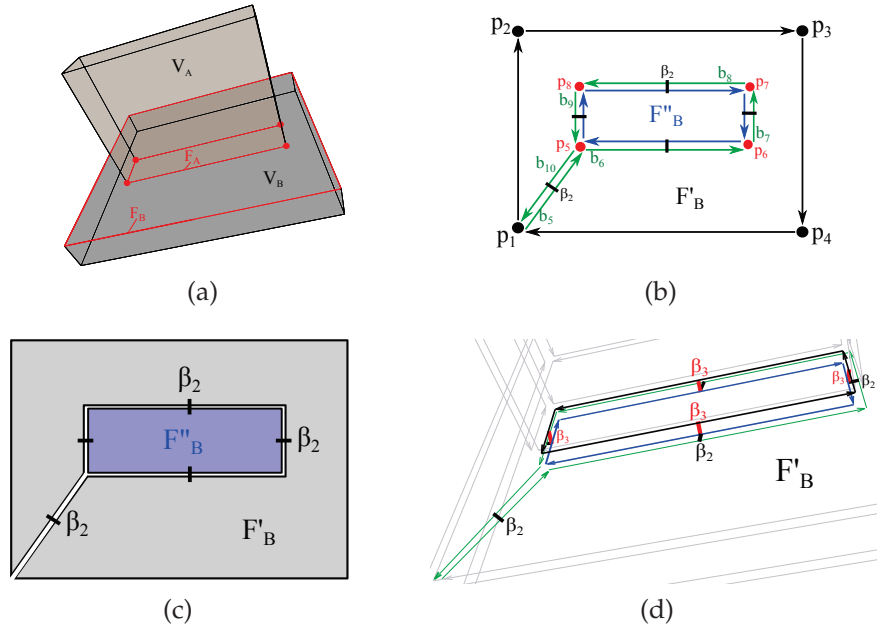


FIGURE 67 – (a) Deux volumes V_A et V_B en contact au niveau de leur faces superposées F_A et F_B . (b) Découpe de F_B pour obtenir la face coupée F'_B et la face correspondante à la surface de contact F''_B (bleue). (c) Illustration de F'_B (grise) et F''_B (bleue) liées par β_2 à leurs frontières communes. (d) 3-couture entre V_A et V_B via F_A (noire) et F''_B .

Le cas de figure (iii) est illustré par la figure 67, avec la même configuration que la figure 65 à la différence que F_A et F_B ne sont pas triangulées. Cela a pour conséquence que tous les points appartenant à F_A (p_5 à p_8) au niveau de la surface de contact constituent des points internes pour F_B (cf. figure 67a). Dans pareille situation, du fait de l'inexistence d'intersection entre les frontières des deux faces, une 1-cellule est créée entre une des 0-cellules de F_B et une des 0-cellules internes : c'est l'arête $[p_1p_5]$ sur notre exemple (cf. figure 67b), définie par les brins b_5 et b_{10} . Ces deux brins constituent l'entrée et la sortie du cycle de brins qui va former une 2-cellule fermée F''_B permettant ainsi de décrire un trou dans F_B qui devient F'_B (cf. figure 67c). F'_B et F''_B sont 2-cousues le long des 1-cellules qu'elles partagent. Il ne reste plus qu'à procéder à l'opération de 3-couture entre V_B et V_A via F_A et F''_B (cf. figure 67d).

Cas Particulier de Nouvelles Intersections

Il peut arriver que l'insertion d'arêtes fictives dans une face crée de nouvelles intersections avec les autres faces superposées à elle lors de la deuxième étape du processus de découpe. Ces intersections sont à prendre en compte pour une découpe correcte de toutes les surfaces de contact. Leur apparition s'explique par le fait que toutes les intersections entre les arêtes de toutes les faces coplanaires sont détectées en une seule passe lors de la première étape (cf. section 3.4.2), alors que les arêtes fictives sont créées durant l'étape suivante.

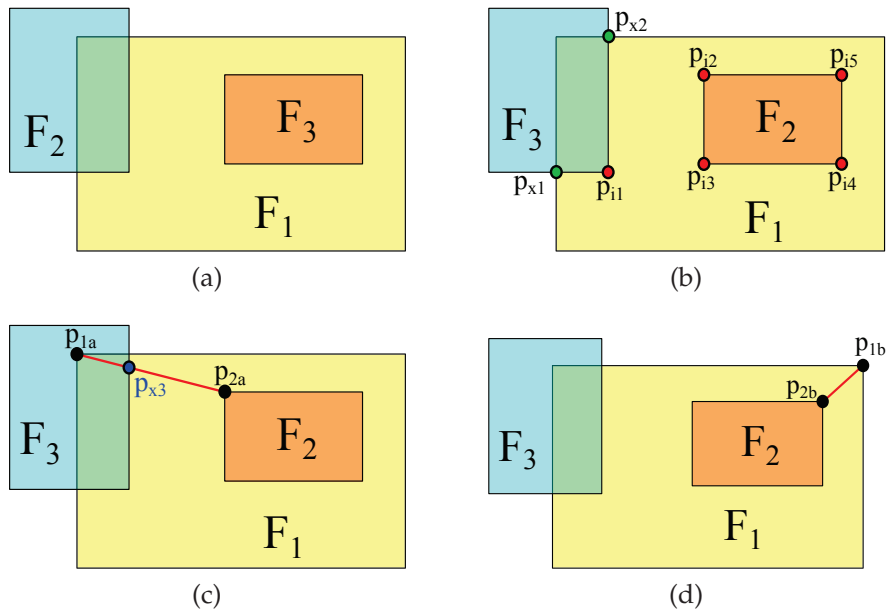


FIGURE 68 – (a) Une face F_1 superposée à F_2 et F_3 . (b) Points d'intersection (verts) et points internes (rouges). (c) Insertion d'une arête entre p_{1a} et p_{2a} créant une nouvelle intersection. (d) Arête entre p_{1b} et p_{2b} sans nouvelle intersection.

Par exemple dans la figure 68, le calcul des intersections entre les arêtes de F_1 , F_2 et F_3 permet la détection de p_{x1} et p_{x2} . Supposons ensuite que lors de la deuxième étape la découpe entre F_1 et F_2 soit étudiée en premier ; la recherche des points internes révèle les points p_{i2} à p_{i5} (cf. figure 68b), correspondant au cas de figure (iii) et impliquant l'insertion d'une arête de départ. Cette arête est insérée entre deux points, l'un appartenant à la frontière du trou et l'autre à la frontière de la face qui la contient, $[p_{1a}, p_{i2}]$ sur notre exemple (cf. figure 68c). Cette insertion produit un nouveau point d'intersection p_{x3} à la frontière de F_3 . Mais lorsque la découpe de F'_1 par rapport à F_3 sera étudiée par la suite, l'existence de ce point sera ignorée car tous les points d'intersection entre arêtes sont supposés avoir été traités lors de la première étape du processus de découpe. Pour cette raison, une deuxième passe de vérification réservée aux arêtes fictives est nécessaire pour assurer l'insertion d'éventuels nouveaux sommets d'intersec-

tions et une découpe identique au niveau de toute la surface de contact.

La nouvelle passe de vérification des intersections est une opération qui se déroule comme la première étape du processus de découpe, à la différence qu'elle n'est nécessaire que sur les arêtes des faces ayant reçu des arêtes fictives et sur celles des faces qui leur sont superposées. Par ailleurs, c'est une opération qui se déroule entre la deuxième et la troisième étape, car c'est durant cette dernière étape que les nouveaux points d'intersection interviennent pour la découpe des faces correspondantes. Afin de réduire au maximum la probabilité d'intersection avec d'autres faces superposées, nous choisissons pour les arêtes fictives la paire de points qui minimise la longueur de l'arête créé (cf. figure 68d). Cela ne garanti cependant pas l'inexistence de nouvelles intersections.

SYNTHÈSE Ainsi s'achève le processus de reconstruction topologique sur notre modèle EBM-LCC. Chronologiquement, ce dernier était initialement défini par $C = (B, \beta_1, \beta_2 = \emptyset, \beta_3 = \emptyset)$, en d'autres termes une soupe de 2-cellules sans relations topologiques explicites obtenue à partir des données d'entrée (cf. section 3.2). Puis s'en est suivie une phase de nettoyage des 2-cellules (cf. section 3.3), à l'issue de laquelle C est devenu $C_N = (B_N, \beta_1, \beta_2 = \emptyset, \beta_3 = \emptyset)$. Ensuite les phases de construction des relations β_2 (cf. section 3.4.1) et β_3 (cf. section 3.4.2) entre les 2-cellules et 3-cellules de C_N ont permis de faire de ce dernier une seule composante connexe tel que $\forall b \in B_N, \beta_2(b) \neq \emptyset$, et la 3-carte est connexe.

3.5 METHODE DE RECONSTRUCTION AVANCÉE

Dans cette section, nous présentons une version améliorée de la reconstruction topologique et nous la comparons avec l'approche précédente. L'objectif reste le même, à savoir, faire un partitionnement spatial des composants du modèle en créant les liens β_2 entre les faces pour former les volumes et les liens β_3 entre les volumes afin d'obtenir un EBM-LCC entièrement connecté. Cependant, ici nous allons traiter des modèles qui ne respectent pas la précondition (P3) définie pour les données d'entrée de la reconstruction ainsi que les contraintes qu'elle implique (cf. section 3.1.1). Il s'agit plus précisément de modèles dans lesquels des faces sont manquantes, en surnombre ou mal orientées, ne permettant pas une reconstruction topologique correcte. Nous allons dans un premier temps discuter de l'origine et des spécificités de ces problèmes puis par la suite, présenter la méthode qui a été adoptée pour leur faire face.

3.5.1 Faces manquantes ou en trop et problèmes d'orientation

Il n'est pas rare d'avoir dans des modèles 3D de bâtiment des descriptions géométriques incomplètes ou incohérentes. Il ne s'agit malheureusement pas de simples faces dont la géométrie est défailante, ce qui rend leur détection plus

complexe. Nous avons ainsi identifié deux cas pénalisants pour la reconstruction topologique : les faces manquantes ou en trop et les faces mal orientées. Nous les détaillons et illustrons à travers les sections qui suivent.

2-cellules manquantes ou en trop

Comme évoqué précédemment, l'ensemble des volumes qui représentent des éléments structuraux du bâtiment sont supposés être des volumes fermés. Nous appelons ici face manquante toute 2-cellule nécessaire à un ensemble de 2-cellules connectées par β_2 pour former une 3-cellule fermée. Il y a principalement deux explications possibles à ce problème : soit les faces ne sont pas décrites dans les données d'entrée (cf. figure 69a) soit elles ne sont pas décrites en nombre suffisant pour permettre une reconstruction topologique correcte (cf. figure 69b). Le premier cas a pour conséquence la formation de composants incohérents comme par exemple l'obtention d'un grand volume à la place des deux petits escomptés. Dans le second cas, certaines 2-cellules se retrouvent à avoir des brins 2-libres (et donc des bords) car n'ayant aucune face avec laquelle être 2-cousue.

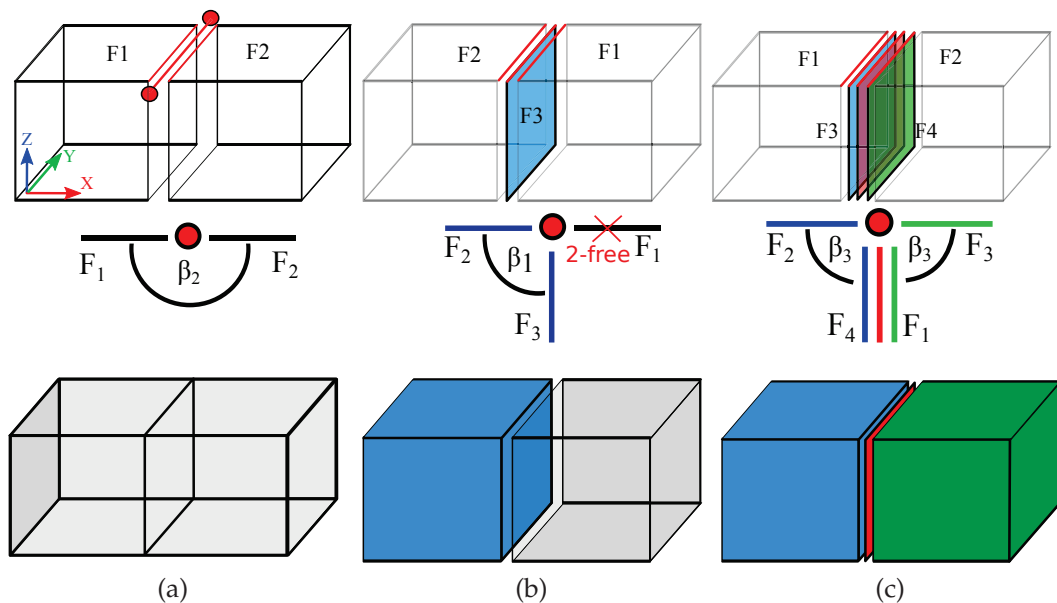


FIGURE 69 – Configurations des faces au niveau de la zone de contact entre deux cubes (ligne du haut), leurs situations correspondantes durant le tri angulaire projeté sur l'axe xz (ligne du milieu) et les volumes reconstruits (ligne du bas). (a) En l'absence de face entre eux les deux cubes sont liés pour ne former qu'un volume. (b) En la présence d'une seule face séparatrice, seul l'un des deux cubes forme un volume fermé à l'arrivée. (c) En présence de plus de deux faces, dans le meilleur des cas les volumes sont bien reconstruits mais il reste des faces isolées dans le modèle.

Dans les deux cas, ces défaillances s'expliquent par différentes raisons, intentionnelles ou non. Cela peut provenir par exemple de certains processus automatiques de simplification des outils utilisés (logiciels CAAO) pour concevoir le modèle (suppression des informations redondantes, fusion de composants, etc) ou simplement des erreurs de modélisation de la part des concepteurs. Vu qu'une subdivision complète du modèle en plusieurs volumes cohérents doit être fournie, afin de représenter correctement chaque composant du bâtiment, il faut veiller à ce que toutes les 3-cellules produites soient spatialement bien définies.

Par ailleurs, il peut aussi y avoir des faces en surnombre qui sont à l'origine des cas similaires à celui de la figure 69c. Contrairement aux faces manquantes, ce sont généralement des géométries insérées de manière volontaire pour pallier à des besoins esthétiques. Excepté l'exemple de la figure 69a dans laquelle rien ne permet de savoir que les deux volumes doivent être séparés, notre méthode de reconstruction avancée aspire à faire face aux cas de figure similaires aux exemples des figures 69b et 69c.

2-cellules mal orientées

Il est nécessaire d'avoir toutes les 2-cellules orientées correctement lors de la reconstruction topologique. Comme expliqué dans la section 3.4.1, deux 2-cellules différentes peuvent être 2-cousues uniquement si elles partagent un même bord avec leur brins respectifs ayant des orientations opposées. De même, deux 3-cellules peuvent être liées par β_3 uniquement si elles sont adjacentes en deux 2-cellules géométriquement et topologiquement identiques, et une fois de plus orientées de manière opposées (section 3.4.2). Ainsi, une conséquence directe de la présence de faces mal orientées dans le modèle est la production d'une reconstruction incohérente, conduisant à des volumes aberrants ou mal définis (ouverts). Par exemple dans la figure 70a, seul un cube pourra être convenablement reconstruit grâce au tri angulaire, résultant ainsi sur la création d'un cube ouvert auquel il manque une face. Dans une 3-carte, une bonne configuration à l'adjacence de deux volumes requiert exactement au plus une paire de 2-cellules confondues, et contrairement orientées comme l'illustre la figure 70b.

Puisque nos données d'entrée sont constituées d'informations géométriques pures, représentées par un ensemble non structuré de polygones, il est difficile d'envisager une règle spécifique sur la question de l'orientation des faces au début du processus. Les faces sont alors considérées comme valides à partir du moment où elles ont une séquence d'au minimum trois sommets. Mais rien ne permet de vérifier la validité de l'orientation d'une face donnée avant le début du processus de reconstruction, car cette orientation dépend de la configuration des faces voisines et du volume fermé que ces faces décrivent.

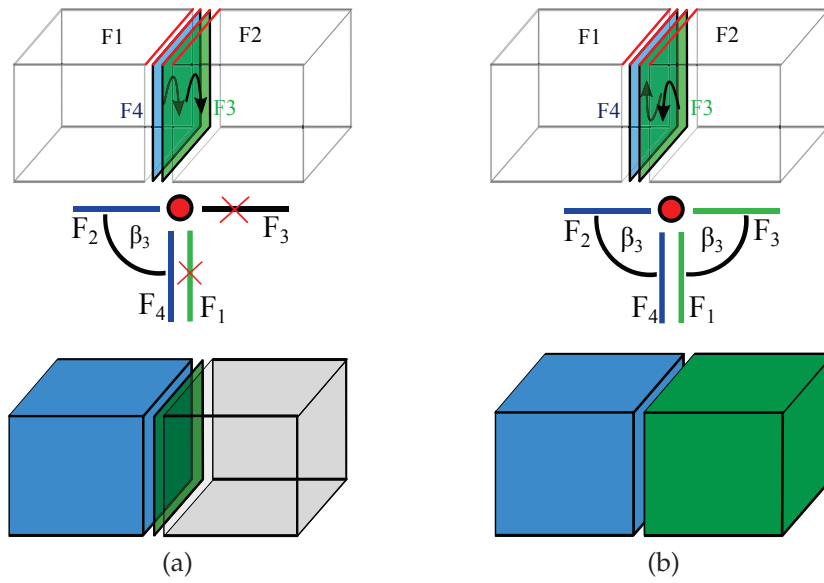


FIGURE 70 – (a) Deux faces présentes à la zone de contact entre les deux cubes mais avec une orientation identique, résultant sur la bonne définition d’un cube sur deux, et des 2-cellules 2-libres. (b) La configuration correcte, avec deux faces géométriquement identiques et contrairement orientées, résultant sur la reconstruction des deux cubes sans brin 2-libre.

Nous avons choisi d’adopter une approche visant à régler de manière globale les problèmes d’orientation et de faces manquantes ou en trop. L’objectif est de s’arranger pour que toutes les 2-cellules du modèle traité soient configurées de manière adéquate pour permettre de reconstruire un ensemble de 3-cellules fermées. C’est dans cette perspective que nous introduisons notre approche intitulée *Smart Spatial Subdivision Reconstruction*.

3.5.2 Principe Général du Smart Spatial Subdivision Reconstruction (3SR)

Dans la première méthode de reconstruction, nous avons considéré que toutes les préconditions définies sur les données d’entrée étaient respectées. De ce fait, les opérations de 2-coutures étaient traitées juste après les prétraitements de base sur les données d’entrée brutes. Puis plusieurs intersections entre les faces étaient calculées pour être en mesure de procéder à des opérations de 3-couture entre les volumes. Dans la 3SR, bien que nous commençons avec un EBM-LCC nettoyé $C_N = (B_N, \beta_1, \beta_2 = \emptyset, \beta_3 = \emptyset)$, nous supposons que la configuration des faces n’est pas forcément correcte, et nous proposons de définir une meilleure configuration pour la reconstruction topologique.

Le principe du 3SR repose principalement sur le calcul de l’arrangement 2D procuré par les 2-cellules du modèle [1]. Un arrangement fournit le partitionne-

ment en dimension 0, 1 et 2 de l'espace 2D induit par un ensemble de courbes. Dans notre cas, nous utilisons les 1-cellules qui forment les bords des 2-cellules de C_N comme données d'entrée. La figure 71 en est une illustration. Ainsi plusieurs polygones de formes différentes et qui s'intersectent sont confrontés (cf. figure 71a) et il en ressort un groupe de nouvelles faces représentant la subdivision créée par les arêtes des différents polygones (cf. figure 71b). Au delà des simples intersections entre les arêtes, c'est tout l'espace occupé par les géométries fournies en entrée de l'arrangement qui est concerné. La face F_5 qui contient à l'intérieur de ses frontières toutes les autres faces en est l'exemple. Ainsi, à la fin du processus, elle devient une face comportant deux trous (cf. figure 71d), à l'image de l'ensemble des polygones qu'elle contenait (cf. figure 71c).

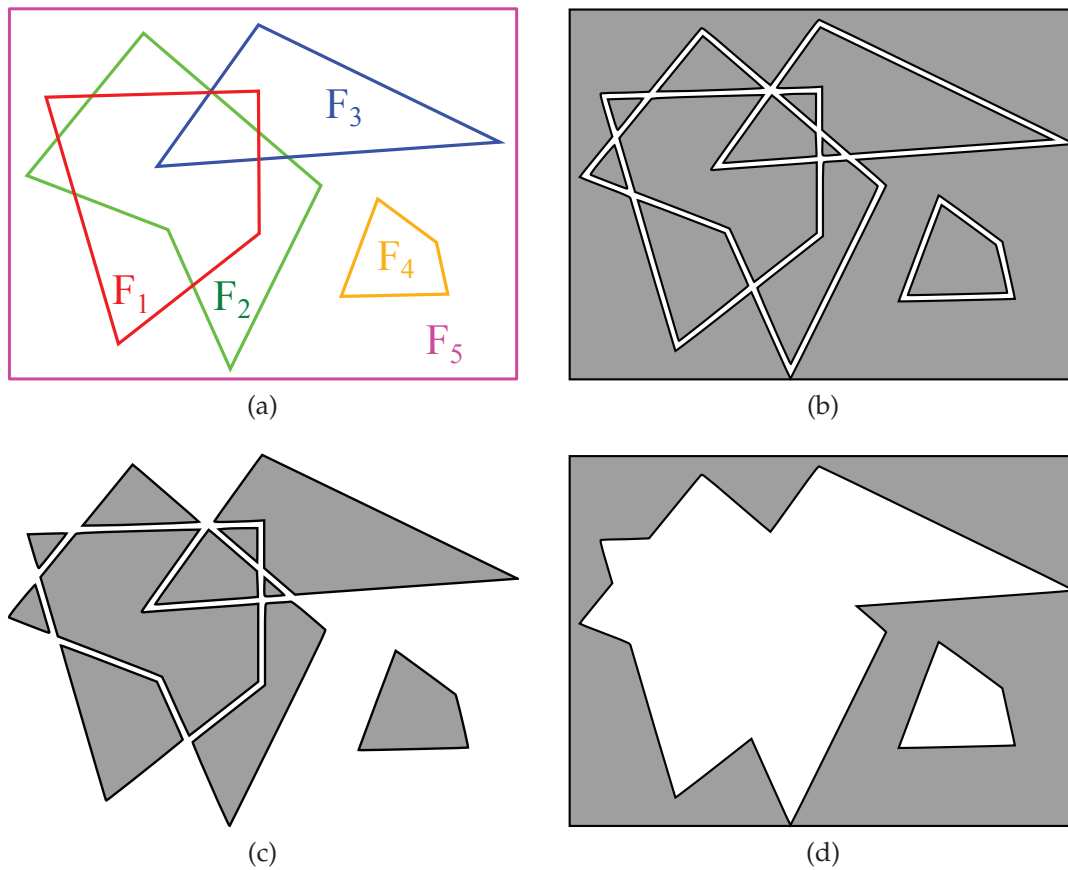


FIGURE 71 – Illustration d'un arrangement 2D. (a) Ensemble de cinq faces présentant des intersections de leurs bords. (b) Partitionnement résultant de l'arrangement. (c) Ensemble des faces contenues dans la face F_5 . (d) Face F_5 isolée à l'issue de l'arrangement.

À la vue des conditions requises pour le bon déroulement de la reconstruction topologique, à savoir les opérations de 2-couture (section 3.4.1) et de 3-couture

(section 3.4.2), l'intérêt que présente le processus des arrangements 2D est clair. En effet ce dernier permet l'uniformisation des configurations des faces aux intersections entre les volumes en fournissant directement les surfaces de contact entre les 2-cellules superposées. Par ailleurs, il suffira de dupliquer les faces obtenues après l'arrangement en veillant à ce que l'orientation des doublons soit l'opposée de celle de leur originale pour garantir à toute 2-cellule $\in C_N$ une autre 2-cellules correspondante pour une opération de 3-couture entre leur volumes respectifs. Ainsi, les faces manquantes sont comblées et les faces en trop sont supprimées.

3.5.3 Reconstruction des Liens entre les 2-cellules

Comme dit précédemment, la 3SR commence avec un EBM-LCC qui ne contient que des 2-cellules nettoyées mais non connectées. L'objectif est donc d'obtenir une configuration propice aux opérations de reconstructions. Plus concrètement, nous procédons au 3SR en ajoutant les étapes suivantes entre les prétraitements et les opérations de 2-couture sur C_N :

- Collection des faces coplanaires et calcul de leurs arrangements 2D sur leur plan commun ;
- Création des faces résultantes des arrangements et suppression de celles d'origine ;
- Dédoublage des nouvelles faces avec une orientation opposée.

La figure 72 illustre le processus de reconstruction sur deux murs et un plancher adjacents. La première étape est constituée par la collecte de F_1 , F_2 et F_3 dans le même lot de 2-cellules coplanaires, en faisant usage des conditions de coplanarité définies dans la section 3.3.5. Elles sont ensuite projetées sur leur plan commun en tant que faces 2D qui constitueront les données d'entrée de l'algorithme d'arrangement. Comme nous pouvons le remarquer, F_2 et F_3 sont superposées à F_1 . De ce fait l'arrangement résulte sur trois faces adjacentes, deux d'entre elles étant géométriquement équivalentes à F_2 et F_3 . Il faut noter qu'en cas de présence d'une face dupliquée, l'arrangement va simplement produire une seule 2-cellule correspondante.

Une fois l'arrangement déterminé, les faces qui en résultent sont reprojétées sur le plan 3D d'origine et créées comme nouvelles 2-cellules du EBM-LCC. Pour notre exemple, les 2-cellules initiales F_1 , F_2 et F_3 sont retirées de telles sorte qu'au niveau de la zone de contact entre les volumes V_1 , V_2 and V_3 il n'y ait plus aucunes faces superposées (cf. figure.72c). Toutes les 2-cellules de C_N passeront par ce processus, exceptées celles qui sont seules dans leur plan et qui n'ont donc aucune autre face coplaire. À l'issue de cette phase, toute 2-cellule du EBM-

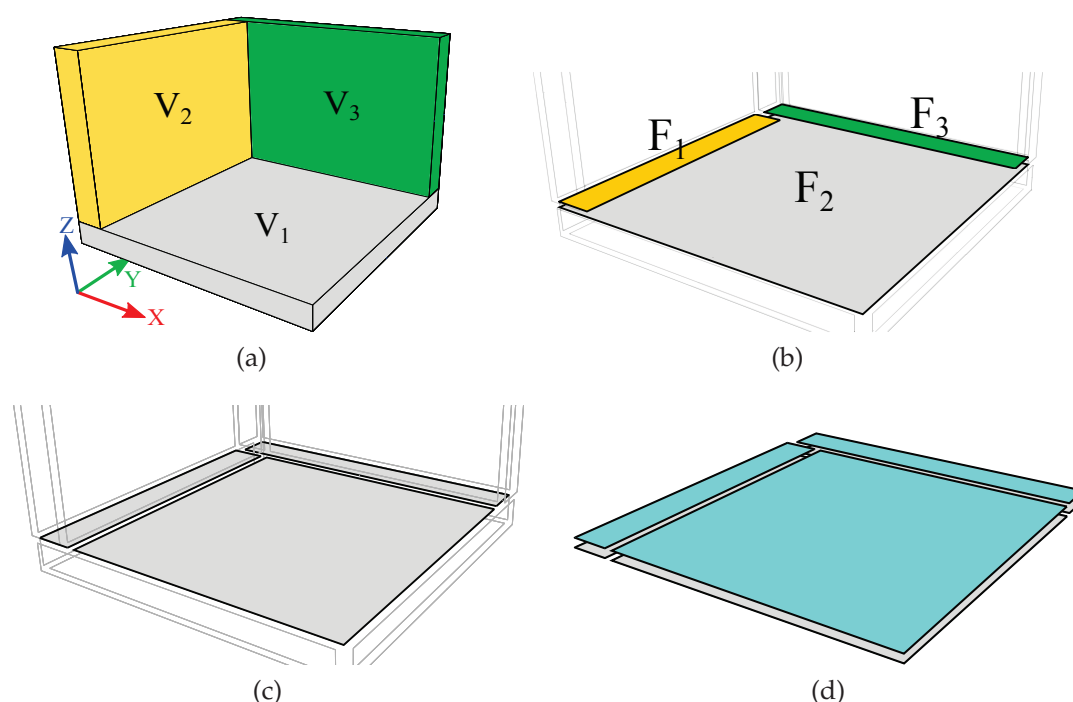


FIGURE 72 – (a) Trois volumes représentant un plancher V_1 (gris), et deux murs V_2 (jaune) et V_3 (vert) partageant des surfaces de contact. (b) Focus sur les trois faces coplanaires appartenant aux trois volumes ; F_2 et F_3 sont superposées avec F_1 . (c) Resultat de l'arrangement entre les faces ; seule F_1 a été découpée. (d) Duplication des faces issues de l'arrangement ; les faces cyans et grises ont des orientations opposées.

LCC est unique, et ne présente aucune superposition avec une autre 2-cellule.

L'étape finale consiste à dupliquer toutes les faces en veillant à ce que ces copies aient une orientation opposée à leur originale (cf. figure 72d). Cela permet ainsi de mettre en place une configuration adéquate de telle sorte qu'autour de chaque 1-cellule du modèle, chaque 2-cellule présente est assurée d'avoir une 2-cellule géométriquement identique. Ainsi la parité nécessaire au bon déroulement du tri angulaire et des opérations de 3-couture est garantie.

La figure 73 offre un autre point de vue, permettant de mettre plus en évidence les conséquences de la duplication des faces à l'issue de l'arrangement. Le cas étudié présente un modèle décrivant un espace fermé entouré de plusieurs volumes comparables à des murs (cf. figure 73a). Du fait de la projection sur le plan xy , arêtes, faces et volumes correspondent respectivement à points, arêtes et faces de la projection. En s'intéressant de plus près à la surface de contact entre V_2 et V_3 , l'arrangement 2D réalisé entre eux donne deux faces que sont $F_{2,3}$ et F'_3 . À ce niveau, toutes les 2-cellules sont uniques (cf. figure 73c). Puis arrive la phase de duplication des 2-cellules. À l'image de la figure 73d,

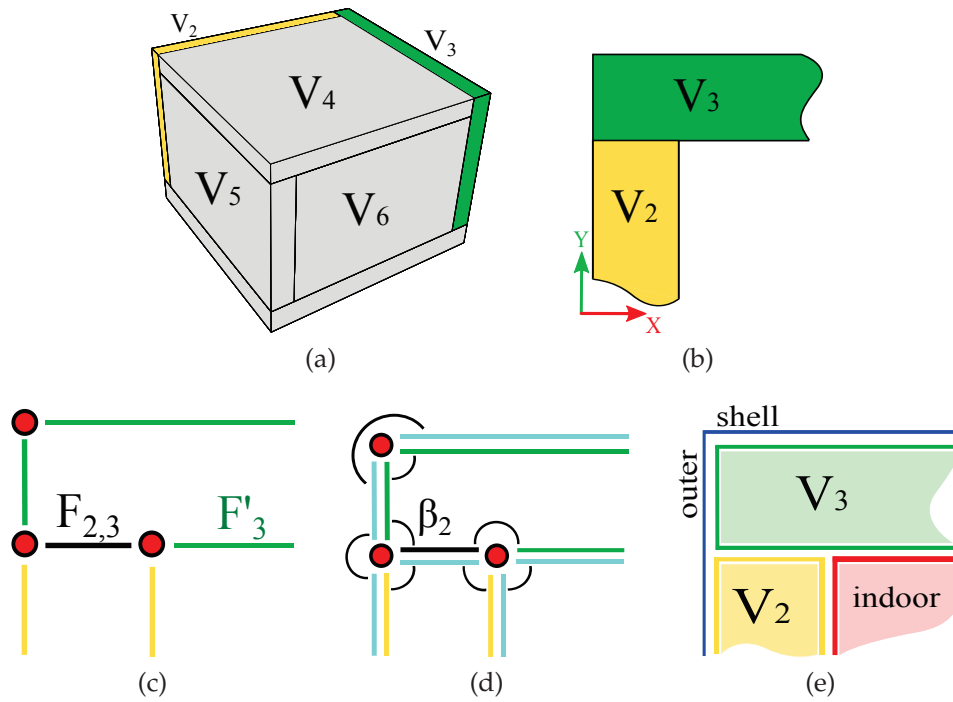


FIGURE 73 – (a) V_4 , V_5 and V_6 sont rajouté au modèle de la figure 72 pour assurer un espace fermé. (b) Zoom sur le contact entre V_2 et V_3 , projetés sur l’axe xy . (c) $F_{2,3}$ est obtenue après l’arrangement entre les faces coplanaires de V_2 et V_3 . (d) Duplication des faces (cyan) puis tri angulaire autour des arêtes (rouge). (e) Subdivision spatiale résultante; V_2 et V_3 sont reconstruits en plus du volume intérieur (rouge) et de l’enveloppe externe (bleue).

cela entraîne qu’il y aura toujours un nombre pair de faces autour de chaque arête. Nous obtenons donc une nouvelle version de C_N que nous appellerons $C_{Arr} = (B_{Arr}, \beta_1, \beta_2 = \emptyset, \beta_3 = \emptyset)$. Ainsi, les opérations de 2-coutures visant à obtenir des volumes fermés peuvent être appliquées plus robustement. En effet, cette solution convient aux trois types de problèmes considérés :

- s’il y avait une face manquante entre deux volumes (comme dans l’exemple de la figure 69b), le clone de cette face permettra de compléter pour avoir deux volumes fermés ;
- s’il y’avait un nombre trop important de faces à la zone d’adjacence entre deux volumes (cf. figure 69c), elles seront réduites à deux faces ;
- enfin s’il y avait bien deux faces entre ces volumes mais que l’une d’elle était mal orientée, la nouvelle paire de face offre les deux seules orientations possibles.

Les conditions adéquates aux opérations de 2-coutures entre les faces sont alors réunies et le processus adopté est le même que celui utilisé par la première

méthode de reconstruction (cf. section 3.4.1). Il en résulte une subdivision volumique totale du modèle comme l'illustre la figure 73e. Grâce à la duplication des faces, tout espace à l'intérieur du modèle se verra décrite par un volume fermé constitué d'un ensemble de faces 2-cousues.

La conséquence de cette duplication, au delà de la reconstitution des volumes de départ du modèle, est que des volumes internes sont créés. Ils correspondent aux volumes d'air contenu dans le modèle. Un volume supplémentaire décrivant l'enveloppe externe qui englobe tout le modèle est également créé. Nous verrons par la suite que ces volumes additionnels sont d'une grande utilité dans le processus de sémantisation automatique ainsi que dans les diverses applications qui résulteront de l'EBM-LCC. Ils sont en général absents des données géométriques d'entrée et ne sont donc pas reconstruit par notre première méthode.

3.5.4 Reconstruction des Liens entre les 3-cellules

Une fois que tout l'espace du modèle est subdivisé en 3-cellules, les opérations de 3-coutures dont l'objectif est d'interconnecter ces volumes sont appliquées directement sans avoir besoin du processus de découpe utilisé dans la première méthode de reconstruction. En effet, puisque toute paire de faces coplanaires dans le modèle est d'ore et déjà composée de 2-cellules géométriquement identiques et d'orientation opposée, les deux conditions régissant les opérations de 3-coutures sont respectées. Le processus de liaison des volumes s'opère donc directement, et met ainsi fin à la reconstruction topologique du modèle. Si toutes les opérations du 3SR se sont bien déroulées, nous obtenons un EBM-LCC final tel que $C_{\text{ATT}} = (B_{\text{ATT}}, \beta_1, \beta_2, \beta_3)$, avec $\forall b \in B_{\text{ATT}}, \beta_2(d) \neq \emptyset$ et $\beta_3(d) \neq \emptyset$.

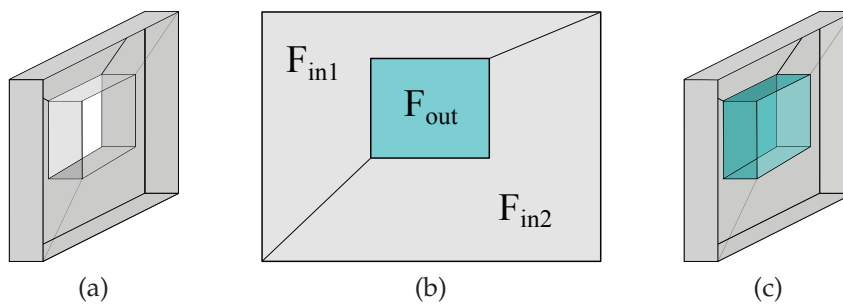


FIGURE 74 – (a) Un volume mur comportant une ouverture de type fenêtre. (b) Résultat de l'arrangement 2D d'un côté du mur. F_{in1} et F_{in2} représentent les faces déjà existantes (grises) et F_{out} la face créée par l'arrangement (cyan). (c) La création puis reconstruction des 2-cellules correspondant à F_{out} donne un nouveau volume correspondant à l'espace de la fenêtre.

Une autre caractéristique intéressante de la 3SR est la possibilité de générer automatiquement des volumes permettant le remplissage des espaces correspondant à des ouvertures dans un modèle de bâtiment. Cela est réalisable grâce à une propriété de l'arrangement 2D, qui fournit naturellement toutes les faces délimitées par les segments des polygones données en entrée, même lorsqu'elles sont absentes dans les données initiales. Ainsi, dans le cas d'un ensemble de polygones coplanaires laissant paraître des trous, de nouvelles faces décrivant ces espaces vides sont également créées. Dans le cas des modèles de bâtiment, ces nouvelles faces correspondent aux volumes d'air et à l'enveloppe externe, mais elles peuvent également correspondre à des ouvertures situées à l'intérieur d'autres volumes comme l'illustre la figure 74. Les deux faces F_{in1} et F_{in2} constituent le mur et la face F_{out} constitue la fenêtre. F_{in1} et F_{in2} sont les 2-cellules utilisées pour procéder à l'arrangement. Puisque leurs surfaces ne se superposent pas, elles ne changent pas à l'issue de l'arrangement, et leurs frontières commune délimitent une face de plus dans l'espace 2D.

Pour détecter si une face appartient à la catégorie des F_{in} ou F_{out} , toutes les faces issues de l'arrangement sont comparées à celles utilisées en entrée. Cette comparaison consiste à prendre le centroïde de chaque face de l'arrangement 2D et à déterminer s'il appartient à une des faces d'origine ou non. Une phase de triangulation des faces permet de procéder au calcul des centroïdes tout en évitant les faces non convexes. Ainsi, les faces de type F_{out} sont celles pour lesquelles aucune correspondance ne sera trouvée. Nous pouvons donc décider de les garder pendant le processus de la 3SR, de telle sorte qu'elles seront rajoutées à la subdivision spatiale et entraîneront la création de nouvelles 3-cellules fermées. Nous pouvons également choisir de les supprimer pour reconstruire uniquement les volumes décrits dans les données initiales.

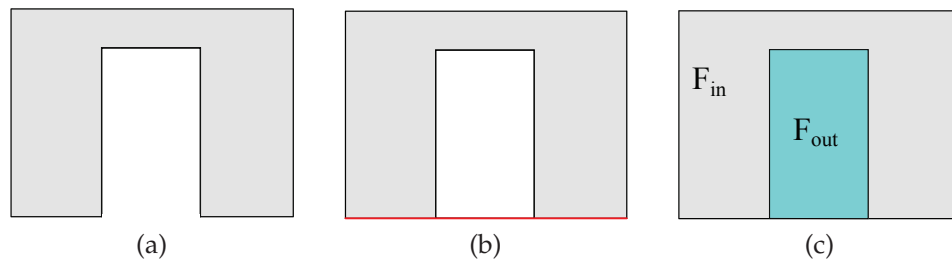


FIGURE 75 – (a) Cas d'un mur contenant une porte. (b) Rajout du segment le plus bas de la boîte englobante des 2-cellules coplanaires. (c) Création de la face de la porte F_{out} .

Les ouvertures de type porte peuvent présenter des problèmes similaires (absence de volume pour représenter la porte). Mais contrairement au cas des fenêtres, les arrangements ne résolvent pas directement ces problèmes. En effet,

comme l'illustre la figure 75a, l'ensemble des polygones formant le mur ne se referme pas autour de la porte. De ce fait, l'ouverture ne constitue pas un trou dans la face du mur et n'est par conséquent pas créée en tant que face à l'issue de l'arrangement 2D. Pour pallier à ce problème, nous avançons l'hypothèse que les planchers sur lesquels les murs d'un bâtiment reposent sont toujours horizontaux. Par conséquent les faces constituant la base d'un même volume mur se doivent d'être également horizontales et alignées, indépendamment de la présence de porte dans le mur. Sur la base de cette hypothèse, une approche simple consiste à rajouter le segment le plus bas de la boîte englobante des faces projetées du volume (cf. figure 75a) à l'ensemble des segments des polygones de départ. Nous délimitons ainsi l'espace fermé occupé par la porte et l'arrangement créera automatiquement la face correspondante, que nous pourrions par la suite décider d'inclure ou non dans la 3SR.

En résumé, la 3SR présente plusieurs avantages par rapport à la première méthode de reconstruction. Il permet de :

- Obtenir l'arrangement 2D des faces coplanaires de manière optimale ;
- Obtenir une meilleure subdivision de l'espace sur des données présentant plus de problèmes ;
- Obtenir directement les volumes internes et l'enveloppe externe ;
- Remplir optionnellement et de manière automatique les ouvertures.

SYNTHÈSE D'une manière globale, la 3SR commence par un EBM-LCC initialement défini par $C = (B, \beta_1, \beta_2 = \emptyset, \beta_3 = \emptyset)$, similairement à l'approche classique. C constitue donc un ensemble de 2-cellules sans relation topologique explicite obtenue à partir des données d'entrée (cf. section 3.2). Puis une phase de pré-traitement des 2-cellules de C (cf. section 3.3), a permis d'en faire un EBM-LCC nettoyé $C_N = (B_N, \beta_1, \beta_2 = \emptyset, \beta_3 = \emptyset)$. Ce dernier subit alors les transformations dues à la méthode des arrangements de la 3SR et devient $C_{Arr} = (B_{Arr}, \beta_1, \beta_2 = \emptyset, \beta_3 = \emptyset)$. Enfin viennent les phases de construction des relations β_2 (cf. section 3.4.1) et β_3 entre les 2-cellules et 3-cellules de C_{Arr} faisant de ce dernier une seule composante connexe tel que $\forall b \in B_{Arr}, \beta_2(b) \neq \emptyset$, et $\beta_3(b) \neq \emptyset$. Autrement dit, il n'y a dans C_{Arr} aucun brin 2-libre ou 3-libre.

3.6 PROBLÈMES DE PRÉCISION

Les problèmes de précision numérique constituent sans doute les problèmes les plus répandus en modélisation. En effet, à partir du moment où des données sont représentées avec des valeurs flottantes, elles sont exposées à des erreurs d'arrondis qui sont souvent des causes d'interprétations erronées lors de la reconstruction topologique. Les modèles 3D, quels que soient les moyens et outils utilisés pour les produire, n'échappent pas à ces problèmes. De plus il s'agit d'er-

reurs rarement ou très difficilement repérables à la vue du modèle. Par conséquent les modelleurs ne s'en rendent pas forcément compte. La figure 76 illustre deux exemples de problèmes récurrents.

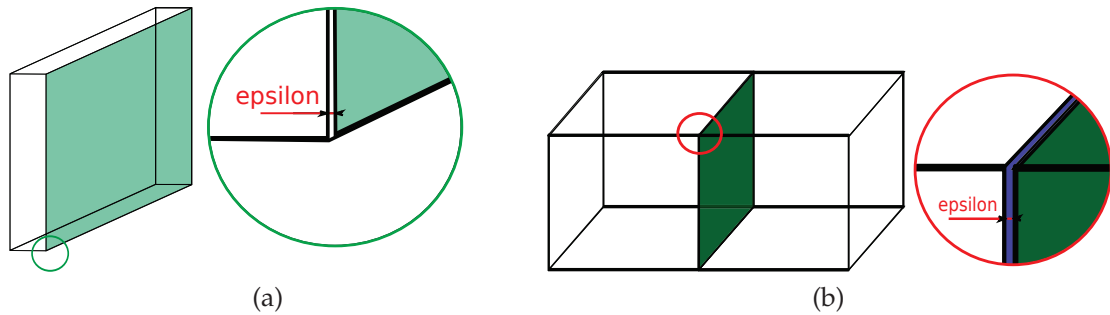


FIGURE 76 – Problème de précision sur des représentations géométriques. (a) Un volume mal fermé du fait d'un petit espace entre des arêtes de deux de ses faces. (b) Deux cubes qui semblent en contact mais qui sont en réalité distant de epsilon.

Au niveau géométrique, ces problèmes se manifestent principalement par des entités géométriques du modèle, qui devraient avoir les mêmes valeurs numériques et qui se retrouvent avec des valeurs très proches mais différentes. De ce fait, nous avons dans les modèles des contacts qui semblent exister visuellement entre les composants mais qui sont en réalité inexistantes, ou encore des faces supposées former des volumes fermés mais qui ne sont pas bien jointes au niveau de leurs bords et laissent des ouvertures sur les surfaces des volumes. La figure 76a fournit un exemple avec un volume qui peut être assimilé à un mur et qui est supposé être un volume fermé. Mais une arête de la face verte est légèrement séparée d'une autre arête avec laquelle elle devrait être confondue. Il en résulte que les deux segments ne seront pas identifiés comme liés de manière topologique lors de la reconstruction, faisant du mur un volume ouvert. Il en est de même pour les deux cubes de la figure 76b, pour lesquels la surface de contact ne pourra pas être déterminée à cause de l'espace qui les sépare. À supposer que chaque cube ait été proprement reconstruit, leur lien topologique ne sera pas retrouvé, résultant ainsi sur un modèle EBM-LCC pas totalement connecté.

Plusieurs approches sont possibles pour tenter de résoudre ces problèmes. Nous avons choisi d'adopter une méthode connue sous le nom d' ϵ -Géométrie [130]. Il s'agit d'inclure dans tous les prédicats géométriques qui régissent nos calculs, une marge d'erreur ϵ qui permettra de contourner, par exemple, les erreurs d'intersections de la figure 76. Cela compense ainsi les inconvénients nourris par les erreurs d'arrondis. Les algorithmes produits sur cette base sont plus robustes, et donc la reconstruction topologique qui en découle produit logiquement de meilleurs résultats. Plus concrètement, nous faisons usage de trois

ϵ différents à travers nos calculs :

- ϵ_{eg} pour les égalités numériques ;
- ϵ_{cop} pour définir la coplanarité entre deux faces ;
- et enfin ϵ_{ang} pour les calculs angulaires.

ϵ_{eg} est impliqué dans tous les calculs nécessitant la comparaison de deux valeurs et constitue la marge spécifiant si ces valeurs peuvent être considérées comme égales ou pas. Ainsi, lors des prétraitements (cf. section 3.3), il intervient durant la fusion des 0-cellules proches, la détection des 2-cellules dégénérées, des doublons de sommets dans les 2-cellules et des faces clonées. ϵ_{eg} permet également de détecter les arêtes confondues lors du tri angulaire précédant la création des liens β_2 et la détection des intersections entre les points et les arêtes lors de la phase de découpe (cf. section 3.4.2), durant la reconstruction topologique.

ϵ_{cop} intervient à chaque fois que la coplanarité entre deux polygones du modèle doit être vérifiée. Il est donc utilisé lors du prétraitement consistant à fusionner les 2-cellules coplanaires, mais également lors des collectes de faces coplanaires qui précèdent le processus de découpe pour les 3-coutures ainsi que le calcul des arrangements (cf. section 3.5.2).

Enfin ϵ_{ang} , est quant à lui utilisé dans toutes les opérations faisant appel à des calculs d'angle. Il sert ainsi de valeur seuil lors du contrôle des orientations dans la détermination de la coplanarité des faces (cf. section 3.3.5) ou encore pour la détection des extensions géométriques qui complexifient les 2-cellules du modèle (cf. section 3.3.3). Bien entendu ϵ_{ang} intervient lors du tri angulaire des faces autour de leur arête commune durant la reconstruction topologique (cf. section 3.4.1).

Bien que l'usage des marges d'erreur ϵ permette de rendre les calculs plus robustes, la détermination de leurs valeurs reste un problème difficile également. En effet ces valeurs sont très dépendantes des types de modèle mais aussi des modèles eux-mêmes, pouvant changer d'un modèle à l'autre. Celles que nous utilisons dans nos travaux ont été choisies par expérience, mais nous ne disposons pas de méthode pour définir ces valeurs de manière automatique. Par ailleurs le choix correct des ϵ est déterminant pour la qualité des résultats de notre approche. Nous proposons une étude de l'influence de ce choix sur la reconstruction d'un modèle dans la section 5.2.5.

IDENTIFICATION AUTOMATIQUE DE L'INFORMATION SÉMANTIQUE

*Pour être confirmé dans mon identité,
je dépends entièrement des autres.*

— Hannah Arendt

Sommaire

4.1	Étiquetage Sémantique Automatique de modèles BIM	106
4.1.1	Formalisme topologique pour les BIMs	106
4.1.2	Identification des composants BIMs	107
4.2	Étiquetage Sémantique Automatique de modèles SIG	120
4.2.1	Formalisme topologique pour les SIG	120
4.2.2	Identification des composants SIG	122

À l'issue du processus de reconstruction présenté dans le chapitre 3, l'EBM-LCC produit, qui à la base ne contenait que des informations géométriques, se retrouve enrichi de l'information topologique. Ainsi la 3-carte à ce stade contient de manière explicite les informations sur les différentes relations spatiales qui lient les composants du modèle bâtiment. Cependant, aucun identifiant spécifique ne permet jusque là de catégoriser, sémantiquement parlant, ces différents éléments de l'EBM-LCC.

L'information sémantique s'avère être indispensable pour l'exploitation d'un modèle dans toute application d'analyse du bâtiment. En effet, c'est cette information qui permet de donner une nature aux volumes traités, ainsi que de leur associer les propriétés et spécificités qui leur sont propres dans la construction réelle. C'est d'ailleurs la principale motivation de la création des standards BIM et SIG, à savoir l'IFC et le CityGML, qui restent des standards principalement orientés vers la sémantique des bâtiments et des villes.

Mais bien que ces formats permettent, à travers des centaines (voire milliers) de classes, de décrire les informations sémantiques associées à tout type de composants d'un bâtiment (allant des éléments structuraux aux meubles, en passant par les installations métiers), ou d'une ville (allant du sous-sol à l'intérieur des bâtiments, en passant par les routes et équipements municipaux), ces informations restent fortement dépendantes des concepteurs des modèles. En effet, il faut que ces diverses classes soient renseignées par les architectes concepteurs des modèles 3D sinon l'information de la nature et des propriétés des divers éléments risquent d'être définitivement perdues.

Très conscient de cela, les acteurs de l'industrie du bâtiment de même que les municipalités veillent à produire des modèles de type IFC ou CityGML, intégralement et minutieusement renseignés dans le cadre des projets de constructions récents, cela dans l'optique d'élargir au maximum les possibilités d'exploitation du modèle. Ils s'aident ainsi des derniers logiciels CAAO de pointe, qui ont aussi compris l'intérêt d'avoir des modèles bâtiments riches et développent ainsi des outils d'aide à la conception pour produire du BIM ou du CityGML. Cependant, il existe peu de solutions pour les modèles déjà existants et qui manquent d'informations. Nous pouvons aisément imaginer à quel point une identification manuelle des divers composants serait coûteuse en temps et en main d'oeuvre.

Dans ce chapitre, nous montrons qu'il est possible d'enrichir notre modèle EBM-LCC en lui rajoutant cette information sémantique qui lui manque, et ce de manière totalement automatique. Nous proposons une méthode basée sur une approche de propagation dirigée par des règles heuristiques afin de deviner l'information sémantique des éléments de bases du bâtiment (mur, toiture, ouvertures, etc.). En s'appuyant sur les informations géométriques et topologiques

déjà présentes dans l'EBM-LCC, nous commençons par identifier un premier élément constituant le point de départ en fonction du type de modèle traité. Le processus de propagation permet ensuite de tirer avantage de chaque nouvelle information sémantique acquise pour l'identification d'autres éléments. Nous mettons en place un formalisme générique permettant la définition de règles flexibles et adaptées. Cette méthode peut être vue comme une extension 3D de la méthode 2D proposée par [75].

L'approche que nous adoptons permet de traiter les modèles de type BIM et de type SIG. Ces deux types de modèles, même s'ils tendent à converger, présentent des spécifications différentes. Pour cette raison, nous allons les traiter différemment, contrairement à la reconstruction topologique qui marche de manière indifférente sur l'un ou l'autre. Bien entendu, les règles heuristiques que nous définissons ne marchent pas tout le temps, mais d'une part elles fonctionnent dans la plupart des cas classiques et d'autre part elles sont modifiables. Par ailleurs, il est possible d'en créer de nouvelles afin de traiter d'autres cas non encore pris en compte. Nous présentons dans la section 4.1 l'étiquetage automatique des composants d'un modèle de type BIM, en introduisant des règles basées sur le formalisme des 3-cartes. La section 4.2 traite ensuite les mêmes questions pour les données de type SIG.

4.1 ÉTIQUETAGE SÉMANTIQUE AUTOMATIQUE DE MODÈLES BIM

Les modèles 3D de la famille des BIMs sont des modèles de type volumique du fait que les différents composants du bâtiment modélisé sont représentés par des volumes. Ce sont des modèles centrés sur le bâtiment lui-même, pouvant décrire jusqu'à ses composants les plus intrinsèques (cf. section 2.1.1). Cependant, notre approche n'est dédiée, pour le moment, qu'aux modèles de bâtiments non meublés et non équipés. Ce sont donc uniquement les principaux éléments structuraux auxquels notre méthode s'adresse. Mais, cette approche reste extensible pour s'attaquer à des cas de figures plus complexes. Pour mieux comprendre la définition des règles heuristiques qui permettront l'indentification des éléments, nous allons dans un premier temps présenter le formalisme topologique des 3-cartes adapté aux modèles de type BIM. Ensuite nous discuterons de l'élaboration des règles proprement dites, en les illustrant par des cas précis.

4.1.1 Formalisme topologique pour les BIMs

Le modèle EBM-LCC dont nous disposons au départ du processus d'étiquetage sémantique peut être défini comme suit : $C_R = (B_R, \beta_1, \beta_2, \beta_3)$. C_R peut être indifféremment obtenu par la méthode de reconstruction classique (cf. section 3.4) ou alors par la méthode des arrangements (cf. section 3.5). Dans un cas comme dans l'autre, une subdivision cellulaire préalable à la reconstruction des liens topologiques a permis de partitionner le modèle en plusieurs 3-cellules représentatives des éléments structuraux d'un bâtiment. Ainsi, chaque volume correspond à un mur, un plancher, une porte, une fenêtre ou un toit. Nous utilisons donc des 3-attributs pour définir les étiquettes sémantiques qui sont attribuées aux 3-cellules, de telle sorte que tous les brins d'une 3-cellule donnée partagent la même information sémantique. Par ailleurs, il peut exister d'autres types d'éléments dans le modèle, mais sans aucune règle prévue pour eux, ils seront soit étiquetés à tort avec une identité sémantique différente (par exemple une cheminée pourrait être identifiée comme étant un toit), soit ils seront sans étiquette sémantique à l'issue du processus.

Toutes les 3-cellules de C_R sont interconnectées et forment une seule composante connexe (cf. section 2.5.1) qui décrit le bâtiment dans son ensemble. Grâce à cela, les relations topologiques peuvent être exploitées dans la définition des règles. Puisqu'une 3-cellule correspond à un composant, les liens β_2 permettent de lier les faces décrivant ce composant. De ce fait, c'est sur la navigation par β_2 que repose l'accès à des parties ciblées du composant en question (par exemple le côté supérieur ou inférieur d'un plancher). Les liens β_3 sont, quant à eux, ceux qui lient les composants entre eux, à savoir : un mur et un plancher, un mur et une porte, un mur et une fenêtre, une porte et un plancher, un mur et un toit, un plancher et un toit, deux murs ou deux toits. Les composants étant liés par β_3

à travers des faces communes, il peut s'avérer nécessaire de parcourir plusieurs faces d'un composant donné, en faisant usage des liens β_2 , jusqu'à tomber sur ses faces 3-cousues recherchées.

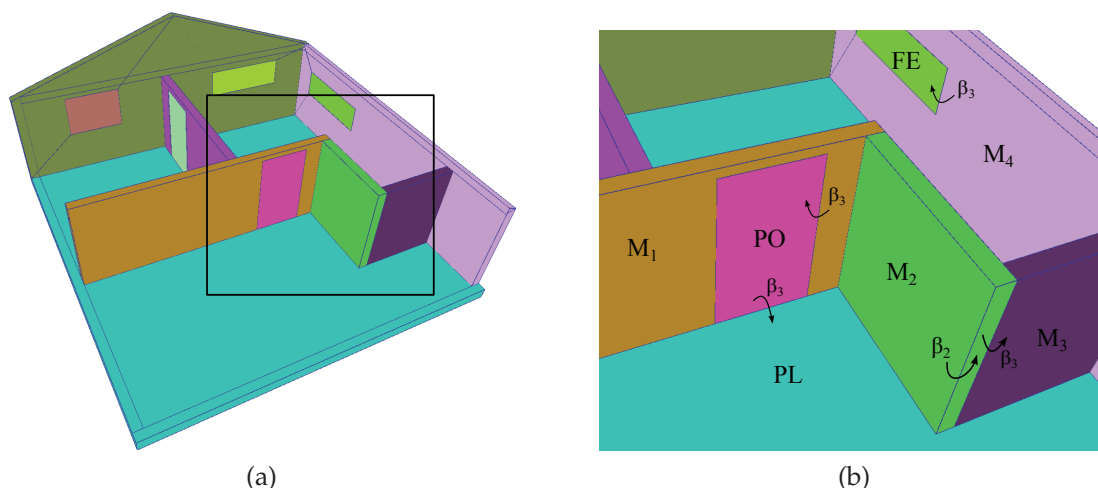


FIGURE 77 – (a) Exemple de subdivision volumique à l'issue de la reconstruction topologique. (b) Navigation par combinaison de β_2 et β_3 pour passer d'un volume à un autre.

La figure 77 illustre le principe de passage d'un volume à l'autre. Nous y voyons par exemple que passer du mur M_1 à la porte PO (cf. figure 77b) nécessitera l'usage du lien β_3 qui les lie. Il en est de même pour passer de PO à PL, ou de M_4 à FE, etc. et vice versa.

4.1.2 Identification des composants BIMs

Notre but est d'attribuer à toutes les 3-cellules de C_R une étiquette sémantique par le biais des 3-attributs de telle sorte que $\forall b \in B_R, 3\text{-attr}(b) \neq \emptyset$. Nous supposons que C_R correspond à un modèle de bâtiment non meublé dans lequel seuls les composants structurels sont représentés, à savoir les murs, les planchers, les portes, les fenêtres et les toits. Pour que le processus de propagation puisse être mis en place, il nous faut être capable d'identifier un premier type d'élément. Puis à partir de ces éléments, les autres éléments seront déduits après analyse de leurs caractéristiques géométriques et des liens topologiques qui les lient. Dans nos modèles BIM ce sont les pièces contenues dans le bâtiment qui constituent le point de départ de la propagation sémantique. Nous les identifions donc en premier puis s'en suivent les murs et les planchers qui les entourent. En se basant sur ces derniers nous identifions les portes et fenêtres et enfin nous procédons à l'identification du toit ainsi que des éléments définissant la façade du bâtiment.

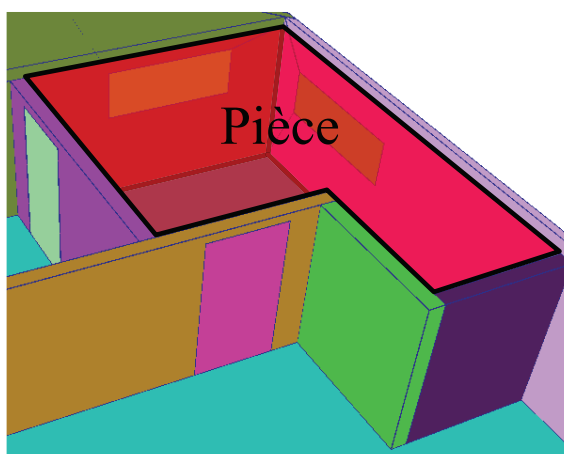


FIGURE 78 – Volume pièce correspondant à l'espace délimité par les éléments structuraux du modèle de la figure 77.

Nous supposons à ce stade qu'aucun volume de C_R ne représente les espaces occupés par l'air à l'intérieur du bâtiment. Ces espaces correspondent à des volumes qui ne sont en général pas géométriquement décrits dans les données d'entrée des modèles mais que l'on peut associer aux pièces existantes dans l'édifice. Du fait que ces derniers soient vides de tout meuble et accessoire, tout espace, en dehors de ceux occupés par les 3-cellules correspondant aux composants de C_R , peut alors être considéré comme étant une pièce (cf. figure 78) ou bien l'espace extérieur au bâtiment.

Dans cette sous section, nous allons discuter dans un premier temps de l'extraction et de l'identification des volumes qui représentent les pièces dans les modèles, en fonction de nos différentes approches de reconstruction topologique. Nous étudierons ensuite étape par étape l'étiquetage sémantique des autres éléments de C_R que sont les murs, les planchers, les portes, les fenêtres, le toit et la façade.

Identification des pièces

Les différences entre les deux approches de reconstruction topologique (cf. chapitre 3) font que des spécificités sont à prendre en compte. Il faut noter que ces différences concernent uniquement l'identification des pièces dans les modèles, l'identification des autres composants étant régie par les mêmes règles pour les deux approches.

SUITE À LA MÉTHODE DE RECONSTRUCTION CLASSIQUE :

Comme spécifié dans la synthèse de la méthode classique de reconstruction topologique (cf. section 3.4.2), si C_R a été obtenu par cette approche, alors il existe des brins $b_i \in B_R$ tel que $\beta_3(b_i) = \emptyset$. En effet, à l'issue de la construc-

tion, toute 2-cellule $F \in C_R$ ayant un brin b tel que $\beta_3(b) = \emptyset$ est une 2-cellule 3-libre pouvant être considérée comme étant une surface de contact entre la 3-cellule qui la contient et l'espace vide (ou volume d'air) entourant cette dernière.

De ce fait, en s'appuyant sur cette propriété, il est possible de reconstituer les volumes d'air à partir des faces qui ont des brins 3-libres dans C_R . Pour cela nous procédons comme suit :

- collection des 2-cellules ayant des brins 3-libres ;
- duplication de ces faces dans l'orientation inverse de leurs faces originales ;
- création des 3-cellules fermées d'air en liant les nouvelles 2-cellules par β_2 ;
- étiquetage sémantique des nouvelles 3-cellules en tant que "pièce".

Le processus présente ainsi des similitudes avec la duplication des 2-cellules durant la reconstruction topologique basée sur les arrangements (cf. section 3.5), sauf qu'ici, les 2-cellules dont les brins ne sont pas 3-libres ne sont pas concernées par la duplication.

La figure 79 illustre les phases précédemment citées sur le modèle de la figure 77 avec une vue de dessus sur les différents volumes, pour des raisons de simplicité et de visibilité. La figure 79a permet de mettre en évidence les parties des murs M_1 à M_6 qui sont liées par β_3 . Ainsi si nous prenons l'exemple de la 3-cellule M_1 , elle est 3-cousue à M_6 et à M_2 , à travers leurs 2-cellules au niveau de leurs surfaces de contact. Par ailleurs, M_1 , comme tous les autres murs, présente aussi des faces sans vis-à-vis direct. La figure 79b montre ainsi les faces issues de la duplication de ces 2-cellules 3-libres, qui correspondent aux faces F'_{1a} et F'_{1b} pour M_1 , F'_2 pour M_2 , ..., F'_6 pour M_6 .

L'opération de création des liens β_2 (cf. section 3.4.1) est ensuite appliquée à toutes ces nouvelles 2-cellules afin de les 2-coudre entre elles et de former de nouvelles 3-cellules symbolisant les volumes d'air. L'orientation inversée qui a été attribuée aux nouvelles faces permet de garantir la possibilité de 3-coudre directement leurs 3-cellules correspondantes avec celles qui les entourent et qui sont formées par leurs faces originales (cf. section 3.4.2). Un ensemble de nouvelles 2-cellules définies par un ensemble de brins B_{PC} se rajoutent donc à C_R qui devient ainsi $C'_R = (B'_R, \beta_1, \beta_2, \beta_3)$, avec $B'_R = B_R \cup B_{PC}$. Dans la figure 79c, nous obtenons ainsi le volume PC_1 qui correspond à la pièce formée par les différents murs de la scène, et les volumes PC_2 et PC_3 qui résultent des autres espaces. La 3-cellule Env quant à elle correspond à une enveloppe externe qui englobe tout le modèle, et représente ainsi l'extérieur du bâtiment. Elle contient entre autres les 2-cellules F''_4 et F''_5 . Du fait que toutes ces 3-cellules sont nouvellement créés, dans C'_R , elles sont directement identifiables. De ce fait, si nous considérons un brin $b \in B'_R$, nous appliquons la règle suivante :

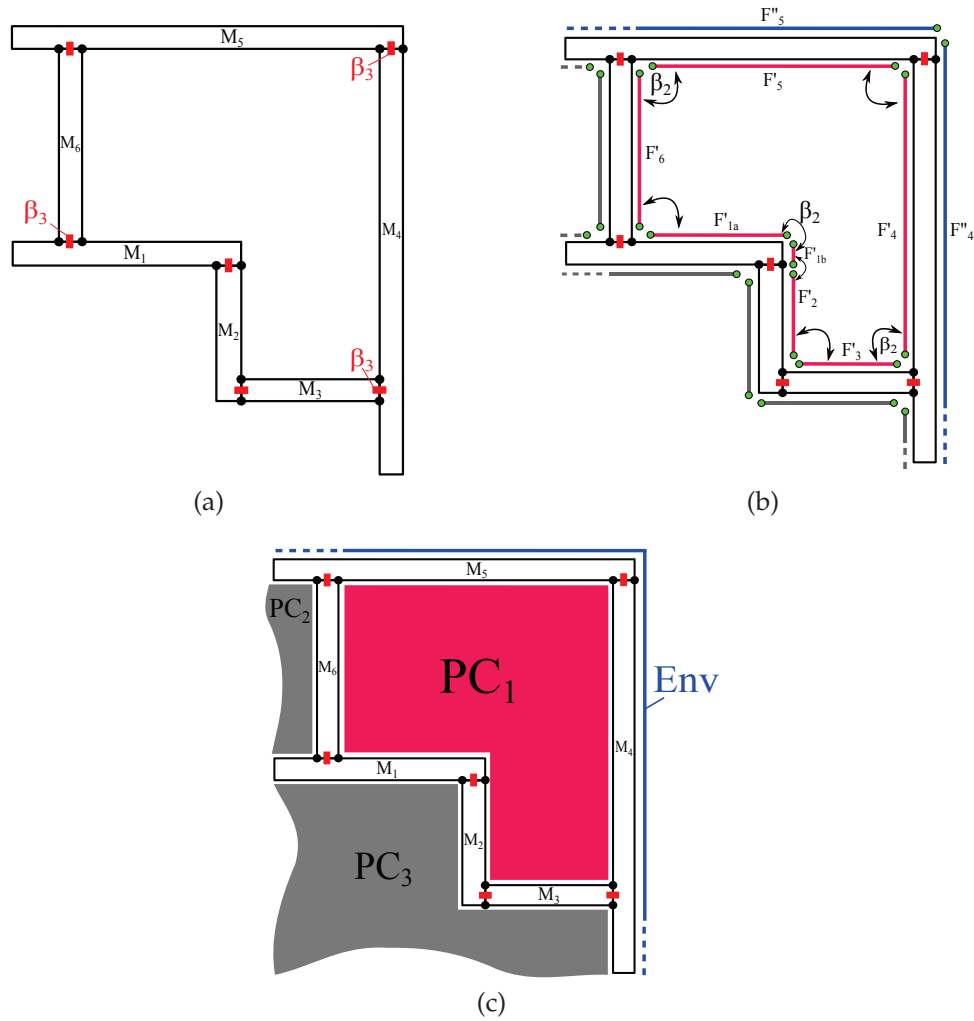


FIGURE 79 – (a) Vue 2D d'une pièce du modèle de la figure 77b. (b) Duplication et liaison par β_2 des faces dont les brins sont 3-libres ; les arêtes voisines (représentées par des points verts) sont en réalité confondues dans l'espace. (c) Volume de la pièce, de l'enveloppe externe et des autres volumes d'air extraits.

$$(1) 3\text{-attr}(b) = \text{"pièce"} \text{ si } b \in B_{PC};$$

Ceci constitue ainsi la première règle qui servira de point de départ à la propagation sémantique sur tous les autres composants du modèle. Il est toutefois nécessaire de faire une distinction spéciale pour l'enveloppe externe qui va elle aussi être identifiée comme une "pièce", si nous nous limitons à la règle (1). Soit V une 3-cellule de C'_R , et V_i , tout volume dans C_R tel que $V_i \neq V$; soit $b \in B_{PC}$ tel que $3\text{-cell}(b) = V$ et $b_i \in B_{PC}$ tel que $3\text{-cell}(b_i) = V_i$:

$$(2) 3\text{-attr}(b) = \text{"enveloppe"} \text{ si } 3\text{-attr}(b) = \text{"pièce"} \\ \text{et } \forall V_i, \text{Vol}(V_i) < \text{Vol}(V);$$

avec, $\text{Vol}(V)$ représentant la valeur du volume de la 3-cellule V . Ainsi, la 3-cellule qui sera retenue comme étant l'enveloppe externe sera celle qui a le plus grand volume parmi celles ayant l'étiquette "pièce". Nous présentons par la suite l'approche adoptée pour déterminer la magnitude du volume d'une 3-cellule dans un EBM-LCC.

CALCUL DU VOLUME D'UNE 3-CELLULE :

La méthode usuelle de calcul du volume d'un polyédre consiste à trianguler sa surface, puis à appliquer l'équation suivante, proposée entre autre dans [168]. Soit V une 3-cellule composée de k 2-cellules triangulaires F_i avec $p_{i1}(x_{i1}, y_{i1}, z_{i1})$, $p_{i2}(x_{i2}, y_{i2}, z_{i2})$ et $p_{i3}(x_{i3}, y_{i3}, z_{i3})$ les trois 0-cellules de F_i . Le volume $\text{Vol}(V)$ est obtenu par l'équation suivante :

$$\text{Vol}(V) = \frac{1}{6} \sum_{i=1}^k \begin{vmatrix} x_{i1} & y_{i1} & z_{i1} \\ x_{i2} & y_{i2} & z_{i2} \\ x_{i3} & y_{i3} & z_{i3} \end{vmatrix} \quad (8)$$

Le fait que cette approche nécessite une triangulation peut s'avérer contraignant vu que dans nos processus nous avons intérêt à avoir le moins de 2-cellules possible dans C_R (cf. section 3.3.1). Nous nous intéressons donc à une autre méthode, répandue dans la communauté de la mécanique des fluides numériques, basée sur le théorème de la divergence [30]. Elle stipule que le volume d'un polyèdre peut être déterminé indifféremment du nombre de sommets et de la topologie des faces à sa frontière, tant qu'il est possible de calculer l'aire, le centroïde et la normale de chacune des faces.

Soit V une 3-cellule composée de k 2-cellules quelconques F_i , avec $\vec{N}_i = (n_{xi}, n_{yi}, n_{zi})$, $c_i = (c_{xi}, c_{yi}, c_{zi})$ et A_i respectivement le vecteur normal, le centre et la superficie de F_i . Nous obtenons l'expression suivante [34] :

$$\text{Vol}(V) = \frac{1}{3} \sum_{i=1}^k [(c_{xi} \times n_{xi} + c_{yi} \times n_{yi} + c_{zi} \times n_{zi}) \cdot A_i] \quad (9)$$

Nous avons déjà présenté un moyen robuste de déterminer le vecteur normal et l'aire d'une 2-cellule de forme arbitraire par le biais des équations 3 et 4. Pour le calcul du centroïde, notre approche consiste à projeter F_i en tant que polygone 2D F'_i sur le plan (P_i) contenant F_i , tel que F'_i est décrit par les k sommets 2D $p'_i = (x'_i, y'_i)$, avec $p'_{k+1} = p'_1$ et de procéder au calcul de son centroïde 2D $c'_i = (c'_{xi}, c'_{yi})$ par les équations suivantes [28] :

$$\begin{aligned} c'_{xi} &= \frac{1}{6A'_i} \sum_{i=1}^k (x'_i + x'_{i+1})(x'_i y'_{i+1} - x'_{i+1} y'_i) \\ c'_{yi} &= \frac{1}{6A'_i} \sum_{i=1}^k (y'_i + y'_{i+1})(x'_i y'_{i+1} - x'_{i+1} y'_i) \end{aligned} \quad (10)$$

$A'_i = A_i$ car l'aire ne change pas avec la projection en 2D de F_i sur (P_i) . Nous obtenons ainsi le centroïde 2D c'_i qui est à son tour reprojété en tant que point 3D sur (P_i) afin d'obtenir c_i . Nous déterminons ainsi le volume de toutes les pièces de C_R , et la plus grande d'entre elle est considérée comme étant l'enveloppe externe.

SUITE À LA 3SR :

À la différence de la méthode classique, la 3SR fournit directement une subdivision volumique totale de l'espace occupé par le bâtiment (cf. section 3.5). L'EBM-LCC C_{Arr} est déjà tel que $\forall b \in B_{Arr}, \beta_3(b) \neq \emptyset$, dû à la génération automatique des volumes d'air et de l'enveloppe externe durant la méthode d'arrangement 2D (cf. figure 73e). La figure 80 permet d'illustrer le volume pièce qui résulte de la 3SR sur le modèle de la figure 77. Ainsi, si C_R a été obtenu avec la 3SR tel que $C_R = C_{Arr}$, alors les 3-cellules qui doivent être étiquetées en tant que "pièces" sont déjà parmi les volumes existantes, et doivent donc être identifiées. La 3-cellule qui constitue l'enveloppe externe est identifiée de la même manière que pour la méthode classique, en cherchant le plus grand volume de la scène.

Nous devons par contre introduire une autre règle permettant de distinguer les volumes de type "pièce" dans C_R . À ce stade, nous pouvons seulement nous appuyer sur les caractéristiques géométriques des 3-cellules ainsi que leur relations topologiques. Nous allons définir un critère de discrimination des 3-cellules basé sur leur épaisseur. En effet, les composants structurels d'un bâtiment (murs, planchers, portes, fenêtres et toîts) peuvent être assimilées la plupart du temps à des formes parallélépipédiques. Par ailleurs, quelle que soit sa forme, une pièce doit logiquement avoir une épaisseur plus importante que les autres éléments de structure comme par exemple un mur ou un plancher. Nous définissons donc une règle adéquate. Soit V une 3-cellule de C_R et $E(V)$ l'épaisseur de V :

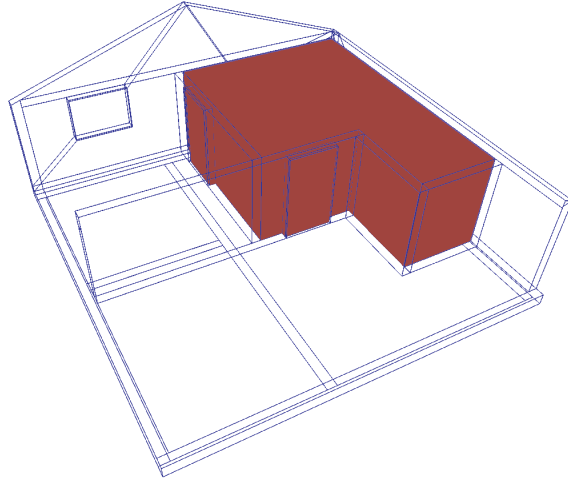


FIGURE 80 – Une 3-cellule représentant une pièce et directement obtenue à l'issue de la 3SR.

$$(1') \text{ 3-attr}(b) = \text{"pièce"} \text{ si } E(V) > E_m \\ \text{et } \forall b' \in \text{3-cell}(b), E(\text{3-cell}(\beta_3(b'))) < E_m.$$

Cette règle stipule ainsi qu'une 3-cellule $V \in C_R$ est considérée comme une pièce si son épaisseur $E(V)$ est supérieur à E_m , l'épaisseur moyenne de tous les volumes de C_R , et si les 3-cellules qui l'entourent (qui sont donc liées à elle par β_3) ont des épaisseurs inférieures à E_m . Nous supposons donc que dans nos modèles, une pièce ne peut être en contact direct avec une autre pièce, sans qu'il n'y ait de 3-cellule(s) intermédiaire(s) entre elles (mur, porte, fenêtre). Le cas échéant, les deux pièces ne constituerait qu'une seule et unique 3-cellule. Après application de cette règle à chaque volume, nous obtenons ainsi un modèle EBM-LCC C_R dans lequel un ensemble de brins $B_p \in B_R$ est tel que $\forall b \in B_p, \text{3-attr}(b) = \text{"pièce"}$, et pour tous les autres brins $b' \in B_R$ et $b' \notin B_p, \text{3-attr}(b') = \emptyset$ ou $\text{3-attr}(b') = \text{"enveloppe"}$. Nous discutons par la suite de la méthode de calcul des épaisseurs sur les 3-cellules de C_R .

DÉTERMINATION DE L'ÉPAISSEUR D'UNE 3-CELLULE :

Le dictionnaire Larousse définit l'épaisseur comme étant "une des dimensions d'un corps, mesurée par l'écart entre ses deux faces principales, plus ou moins parallèles" [51]. Cette définition convient à nos 3-cellules qui sont de types "mur" et "plancher", car d'une part nous pouvons imaginer trouver facilement leur deux faces parallèles principales et d'autre part nous supposons qu'elle ont une épaisseur constante, permettant ainsi la définition d'une seule valeur. Cependant, pour des 3-cellules de type "pièce", ces notions de faces principales et d'épaisseur constante peuvent ne plus convenir. Mais, tout ce dont nous avons besoin ici, c'est d'une épaisseur permettant de catégoriser une 3-cellule de C_R de ma-

nière binaire en tant que "pièce" ou "autre".

Nous présentons ainsi la méthode suivante permettant de déterminer de manière robuste à travers les faces d'une 3-cellule, son épaisseur :

- collecte des faces parallèles de la 3-cellule, dans toutes les directions ;
- sélection de la paire séparée par la plus grande distance pour chaque groupe de faces parallèles ;
- comparaison des paires retenues pour choisir celle présentant la plus petite distance et qui sera retenue comme l'épaisseur.

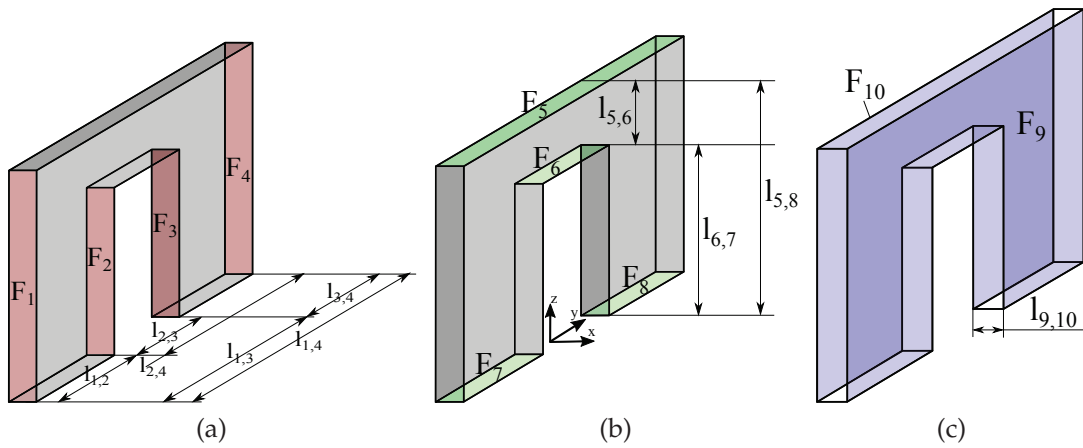


FIGURE 81 – (a) Volume mur sur lequel l'épaisseur doit être déterminée ; collecte des 2-cellules coplanaires suivant l'axe \vec{y} et calcul des distances qui les séparent. (b) Collecte des 2-cellules suivant l'axe \vec{z} . (c) Collecte suivant l'axe \vec{x} , qui correspond à la valeur de l'épaisseur de la 3-cellule.

La figure 81 illustre la méthode sur un volume mur avec une épaisseur bien définie. La collecte des faces parallèles dans la direction de l'axe \vec{y} permet de retrouver les 2-cellules F_1, F_2, F_3 et F_4 (cf. figure 81a). Par la suite les distances qui les séparent sont calculées. Nous obtenons alors $l_{1,2}$, $l_{1,3}$ et $l_{1,4}$, les distances respectives entre F_1 et $\{F_2, F_3, F_4\}$, $l_{2,3}$ et $l_{2,4}$ les distances entre F_2 et $\{F_3, F_4\}$ et $l_{3,4}$ entre F_3 et F_4 . La distance séparant F_1 et F_4 , à savoir $l_{1,4}$ est finalement retenue car c'est la plus longue.

Le même procédé est engagé pour les 2-cellules F_5, F_6, F_7 et F_8 , collectées selon l'axe \vec{z} (cf. figure 81b) et séparées par les distances $l_{5,6}$, $l_{6,7}$ et $l_{5,8}$, sachant que F_7 et F_8 sont coplanaires. La plus longue distance, à savoir $l_{5,8}$ est donc retenue. Enfin, l'étude des faces parallèles suivant \vec{x} dans la figure 81c révèle F_9 et F_{10} , séparées de $l_{9,10}$. Par la suite, une comparaison est faite entre $l_{1,4}$, $l_{5,8}$ et $l_{9,10}$, et il en ressort que cette dernière est la plus petite des trois. $l_{9,10}$ est donc retenue

comme l'épaisseur de la 3-cellule.

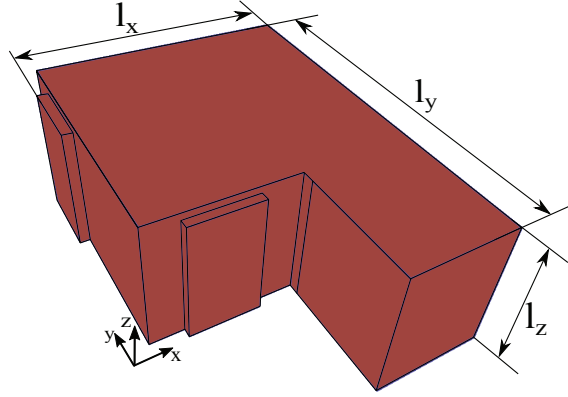


FIGURE 82 – Détermination de l'épaisseur sur une 3-cellule de type pièce.

La figure 82 illustre la même démarche sur le volume pièce de la figure 80. Nous constatons que malgré la forme plus complexe de la 3-cellule, la détermination d'une valeur d'épaisseur reste simple avec la méthode adoptée, nous conduisant dans ce cas à la valeur l_z . Par ailleurs cette dernière est logiquement très importante comparée à ce qu'on pourrait trouver comme épaisseur pour un mur ou plancher. Finalement, en considérant l'ensemble des 3-cellules $V = (V_1, V_2, \dots, V_n) \in C_R$:

$$E_m = \frac{1}{n} \sum_{x=1}^n E(V_x) \quad (11)$$

L'alignement des volumes suivant un repère cartésien connu dans les figures 81 et 82 est juste utilisé à titre d'exemple, mais ne constitue nullement une contrainte dans le calcul de l'épaisseur. Seule la collection des 2-cellules parallèles importe, indifféremment de leur direction.

Identification des murs et planchers

Maintenant que nous avons identifié les pièces du modèle, nous avons à disposition une information supplémentaire à exploiter, en plus de la géométrie et de la topologie pour l'identification des autres éléments. Nous nous intéressons donc à l'étiquetage sémantique des murs et des planchers, qui constituent les principaux composants structurels de tout bâtiment. Nous avançons l'argument que toute pièce est, par définition, délimitée par un ensemble de murs et de planchers qui l'entourent. Par conséquent, toute 3-cellule de C_R identifiée comme une pièce, doit être liée par β_3 à des 3-cellules de type "mur" et "plancher".

Considérons tous les brins $b \in B_R$ tel que $3\text{-attr}(b) = \emptyset$ et $3\text{-attr}(\beta_3(b)) = \text{"pièce"}$. Nous définissons les règles suivantes :

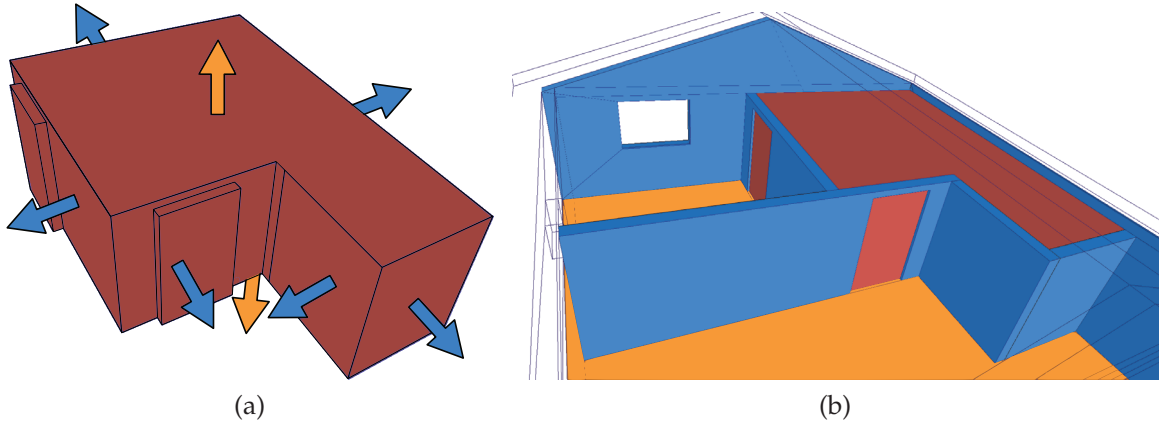


FIGURE 83 – (a) Faces de la 3-cellule de type "pièce" qui sont potentiellement 3-cousues à des 3-cellules de type "mur" (flèches bleues) ou "plancher" (flèches oranges). (b) Volumes mur et planchers identifiés autour de la pièce (le plafond est caché pour des raisons de visibilité).

- (3) 3-attr(b) = "mur" si 2-cell(b) est *verticale* ;
 (4) 3-attr(b) = "plancher" si 2-cell(b) est *horizontale*.

En d'autres termes, les heuristiques (3) et (4) stipulent que toute 3-cellule 3-cousue à un volume pièce sera considérée comme étant un mur si la 2-cellule par laquelle la liaison β_3 est faite est verticale ; sinon elle sera considérée comme un plancher si cette dernière est horizontale. Cette approche tout à fait intuitive est illustrée par la figure 83, dans laquelle un ensemble de flèches bleues indiquent les faces verticales autour de la pièce et des flèches oranges indiquent les faces horizontales (cf. figure 83a). Ces mêmes couleurs sont maintenues pour différencier les 3-cellules identifiées. Cela résulte dans la figure 83b, en un ensemble de 3-cellules bleues de type "mur" et une 3-cellule orange sur laquelle toutes les autres reposent, à savoir le "plancher", sachant que le plafond est aussi identifié comme tel. La figure 84 donne une vision globale du résultat obtenu à l'issue de l'application de ces règles sur un modèle complet de bâtiment.

Le test de verticalité ou d'horizontalité d'une 2-cellule se fait simplement en comparant le vecteur normal de cette dernière à l'axe de la hauteur, en l'occurrence l'axe $\vec{z} = (0, 0, 1)$ du repère cartésien. Ainsi pour une 2-cellule $F \in C_R$ de normale \vec{N} , si l'on considère $\theta_{\vec{z}, \vec{N}}$, l'angle formé par \vec{N} et l'axe \vec{z} alors F est horizontale si :

$$\left\{ \begin{array}{l} \theta_{\vec{z}, \vec{N}} = \frac{\pi}{2} \\ \text{ou} \\ \theta_{\vec{z}, \vec{N}} = \frac{3\pi}{2} \end{array} \right. \quad (12)$$

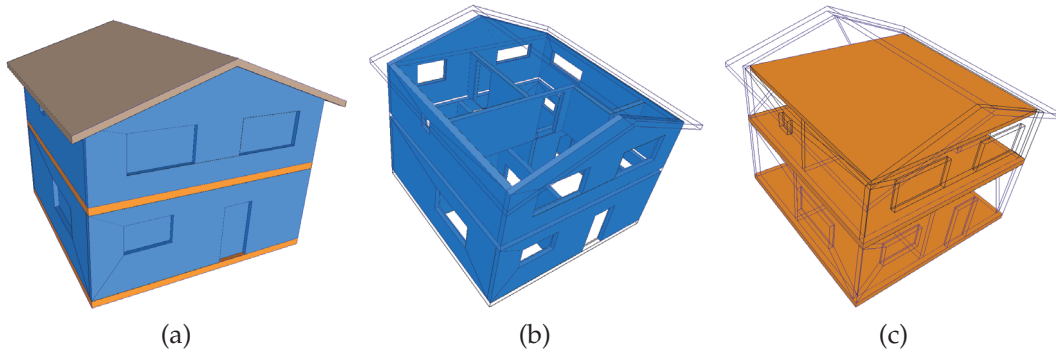


FIGURE 84 – (a) Resultat de l'étiquetage sémantique des murs (bleus) et planchers (oranges) sur un modèle de bâtiment (les volumes non encore identifiés prennent une couleur aléatoire). (b) Tous les murs identifiés du modèle. (c) Tous les planchers.

Et, F est verticale si :

$$\begin{cases} \theta_{\vec{z}, \vec{N}} = 0 \\ \text{ou} \\ \theta_{\vec{z}, \vec{N}} = 2\pi \end{cases} \quad (13)$$

Identification des portes et fenêtres

À ce stade du processus, nous avons identifié les pièces, les murs et les planchers dans C_R . Cependant, une des conséquences des règles (3) et (4) est l'interprétation des 3-cellules représentant les portes et fenêtres comme étant des murs (cf. figure 84a et 85). En effet, du fait qu'elles soient aussi des 3-cellules qui entourent les pièces, elles ont des surfaces de contact avec ces dernières, résultant en des 3-coutures à travers des 2-cellules verticales.

Pour le moment, nous supposons travailler avec des modèles dans lesquels les 3-cellules portes et fenêtres sont simplifiées et représentées par des volumes parallélépipédiques. La section 5.2.3 montre les principales raisons qui confortent cette hypothèse. Nous supposons par ailleurs que toute porte ou fenêtre du modèle comporte au moins une face supérieure et une face inférieure toutes deux horizontales. Nous considérons alors tous les brins $b \in B_R$ tel que $3\text{-attr}(b) = \text{"mur"}$. Soient b_h and b_b deux brins de C_R tels que $2\text{-cell}(b_h)$ et $2\text{-cell}(b_b)$ sont les 2-cellules horizontales supérieure et inférieure de $3\text{-cell}(b)$. Nous définissons alors les règles suivantes :

- (5) $3\text{-attr}(b) = \text{"fenêtre"}$ si $3\text{-attr}(\beta_3(b_h)) = 3\text{-attr}(\beta_3(b_b)) = \text{"mur"}$;
- (6) $3\text{-attr}(b) = \text{"porte"}$ si $3\text{-attr}(\beta_3(b_h)) = \text{"mur"}$ et $3\text{-attr}(\beta_3(b_b)) = \text{"plancher"}$.

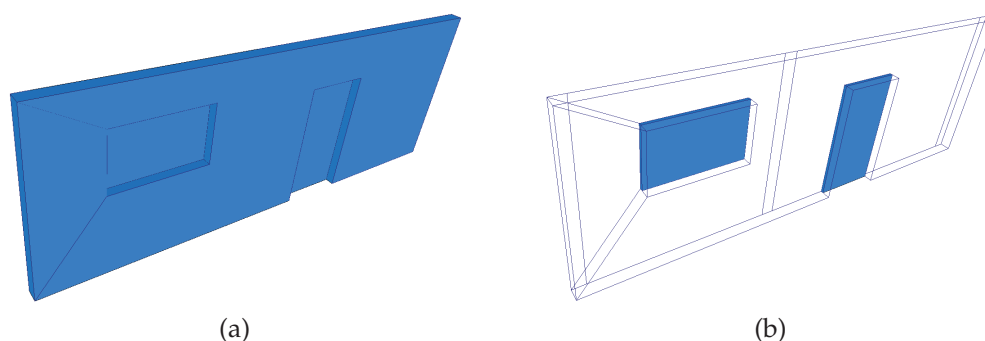


FIGURE 85 – (a) Une 3-cellule de type "mur" contenant une porte et une fenêtre. (b) La porte et la fenêtre sont aussi reconnues comme des 3-cellules de type "mur" car partageant des faces verticales avec les pièces qui les entourent.

Une 3-cellule est ainsi considérée comme une fenêtre si à l'issue des règles (3) et (4) elle constitue ce que nous pourrions appeler *un mur dans un mur*, ce qui fait que ses faces supérieure et inférieure sont toutes les deux liées par β_3 à un volume mur (règle (5)). Similairement, nous considérerons une 3-cellule comme étant une porte lorsque celle-ci est un mur entouré de toute part par un autre mur sauf par le bas, où doit se trouver un volume plancher. Par conséquent sa face supérieure sera 3-cousue à un mur et sa face inférieure à un plancher (règle (6)).

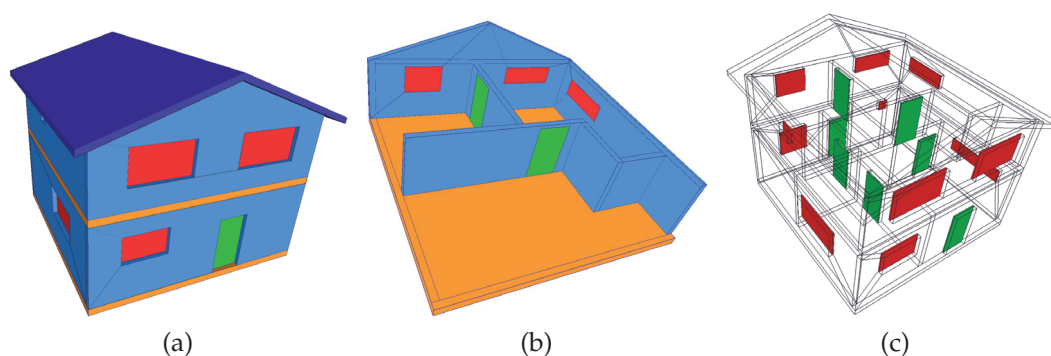


FIGURE 86 – (a) et (b) Toutes les 3-cellules identifiées dont les portes (vertes), les murs (bleus), les planchers (oranges), et les fenêtres (rouges). (c) Vue d'ensemble des 3-cellules ouvertures.

La figure 86 montre le résultat sur les 3-cellules de la figure 77, qui correspondent en fait à une partie du modèle de la figure 84.

Identification du toit et de la façade

Pour plusieurs applications, la notion d'intérieur et d'extérieur est d'un intérêt majeur sur un modèle 3D de bâtiment. Voilà pourquoi la façade constitue une information importante à identifier. Il ne s'agit pas d'un composant de C_R en tant que telle, mais plutôt un ensemble de composants en contact avec l'extérieur. En guise d'exemple, nous définissons ici des règles permettant d'identifier uniquement les murs de la façade ainsi que le toit. Ce dernier faisant toujours partie de la façade d'un bâtiment, nous avons choisi de lui attribuer l'étiquette "toit" afin de permettre de le distinguer du reste, tandis que pour les murs nous utiliserons l'étiquette "façade", ce qui permettra de les différencier des murs intérieurs. Compte tenu de notre représentation topologique, les volumes des pièces sont censés remplir tous les espaces situés à l'intérieur du bâtiment. Par ailleurs, nous avons aussi l'enveloppe externe qui entoure tout le modèle et qui représente en d'autres termes l'espace extérieur. Ainsi, toute 3-cellule de C_R est liée par β_3 soit à des 3-cellules d'éléments intérieurs au bâtiment, soit à la 3-cellule de l'enveloppe externe, soit aux deux.

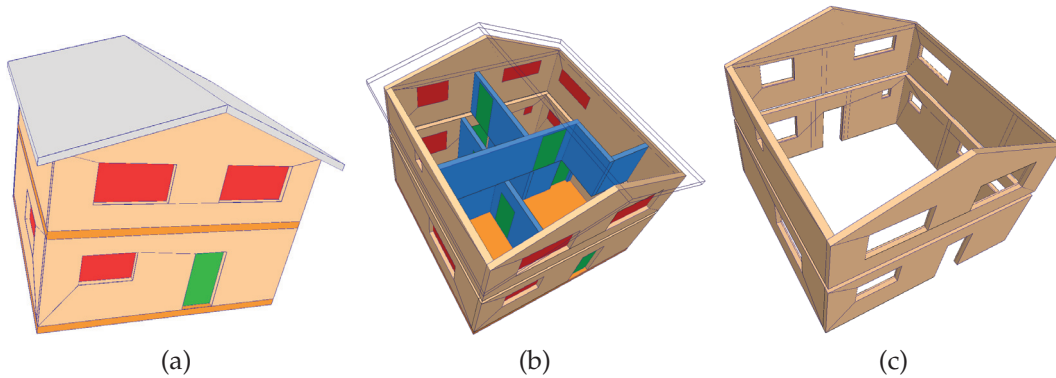


FIGURE 87 – (a) Resultat de l'identification sémantique du toit (argent) et de la façade (beige). (b) Difference entre les murs intérieurs (bleus) et extérieurs (beiges). (c) Ensemble des 3-cellules appartenant à la façade (toit exclu).

Considérons l'ensemble de brins $B_{hi} \subset B_R$ contenant les brins des 3-cellules appartenant au groupe des pièces les plus hautes de C_R suivant l'axe \vec{z} (les pièces du dernier étage du bâtiment). Ces propriétés permettent de proposer les règles suivantes. Nous considérons chaque brin $b \in B_R$, et nous dénotons b_h un brin appartenant à la face horizontale supérieure de $3-cell(b)$:

- (7) $3-attr(b) = \text{"façade"}$ si $3-attr(b) = \text{"mur"}$ et $\exists b' \in 3-cell(b)$ tel que $3-attr(\beta_3(b')) = \text{"enveloppe"}$;
- (8) $3-attr(b) = \text{"toit"}$ (si $3-attr(b) = \text{"plancher"}$, $3-attr(\beta_3(b_h)) = \text{"enveloppe"}$ et $b' \in 3-cell(b)$ tel que $\beta_3(b') \in B_{hi}$ (toits plats)) ;

ou (si $3\text{-attr}(b) = \emptyset$, $\exists b' \in 3\text{-cell}(b)$ tel que
 $3\text{-attr}(\beta_3(b')) = \text{"enveloppe"}$ et $\exists b'' \in 3\text{-cell}(b)$
tel que $\beta_3(b'') \in B_{hi}$ (toits inclinés)).

La règle (7) s'intéresse aux 3-cellules de type "mur" puisque ce sont les seuls éléments pris en compte pour le façade (cf. figure 87b). Elle stipule que tout mur ayant une face en contact avec l'enveloppe externe verra son attribut sémantique changé en "façade". Cette règle peut facilement être modifiée pour inclure d'autres éléments, comme les portes, fenêtres, etc.

La première partie de la règle (8), en ce qui concerne le toit, estime qu'une 3-cellule de type "plancher" ayant sa face supérieure en contact avec l'extérieur et une face liée à une des pièces les plus hautes est un toit plat. Mais si la 3-cellule en question fait partie d'un toit incliné, il n'y a jusque là aucune règle définie qui permettrait de l'identifier, laissant donc le volume sans attribut sémantique ($3\text{-attr} = \emptyset$). Ainsi, si un tel volume a un brin relié par β_3 à une des plus hautes pièces en plus d'un brin 3-cousu avec l'enveloppe, il sera considéré comme faisant partie d'un toit incliné par la seconde partie de la règle (8) (cf. figure 87a). Tous les toits d'un bâtiment ne sont pas nécessairement à la hauteur la plus élevée ou liés aux pièces les plus hautes. Ainsi, pour des cas particuliers d'autres règles plus adaptées doivent être définies.

4.2 ÉTIQUETAGE SÉMANTIQUE AUTOMATIQUE DE MODÈLES SIG

À la différence des BIMs, les modèles décrits par les données SIG sont souvent de nature surfacique et non volumique. En effet les données sont obtenues par des méthodes de scanner laser aériens ou terrestres, des techniques de photogrammétrie ou de stéréovision qui résultent principalement sur des modèles qui ne représentent que les parties visibles des objets modélisés. Les systèmes d'acquisition fournissent un nuage de points plus ou moins dense, qui est ensuite traité et maillé afin d'obtenir une surface polygonale. Dans nos travaux, nos données SIG sont issues de techniques aériennes aiguës pour la reconstruction des toits et des sols et ont été extraites à partir de fichiers CityGML. Dans ce type de modèle, les parois sont obtenues par extrusion des frontières des faces représentant les toits jusqu'à celles représentant le sol. Cela conduit à des modèles avec un niveau de détails moyen correspondant au LoD2 d'un CityGML [115].

4.2.1 Formalisme topologique pour les SIG

Nous avons à disposition, au départ du processus d'identification sémantique, un EBM-LCC $C_S = (B_S, \beta_1, \beta_2, \beta_3)$ obtenu à l'issue de la reconstruction topologique avec la méthode classique (cf. section 3.4). Ce choix s'explique par le fait

que la méthode 3SR n'est pas adaptée aux modèles SIG (cf. section 5.2.4 pour une explication détaillée). La méthode classique permet donc la reconstruction des relations spatiales qui lient les différents éléments d'un modèle SIG de LoD2, mais à la différence d'un modèle BIM représentant un bâtiment unique, il peut y avoir plusieurs composantes connexes dans le EBM-LCC. De plus, il existe dans C_S des brins $b \in B_S$ tel que $\beta_3(b) = \emptyset$.

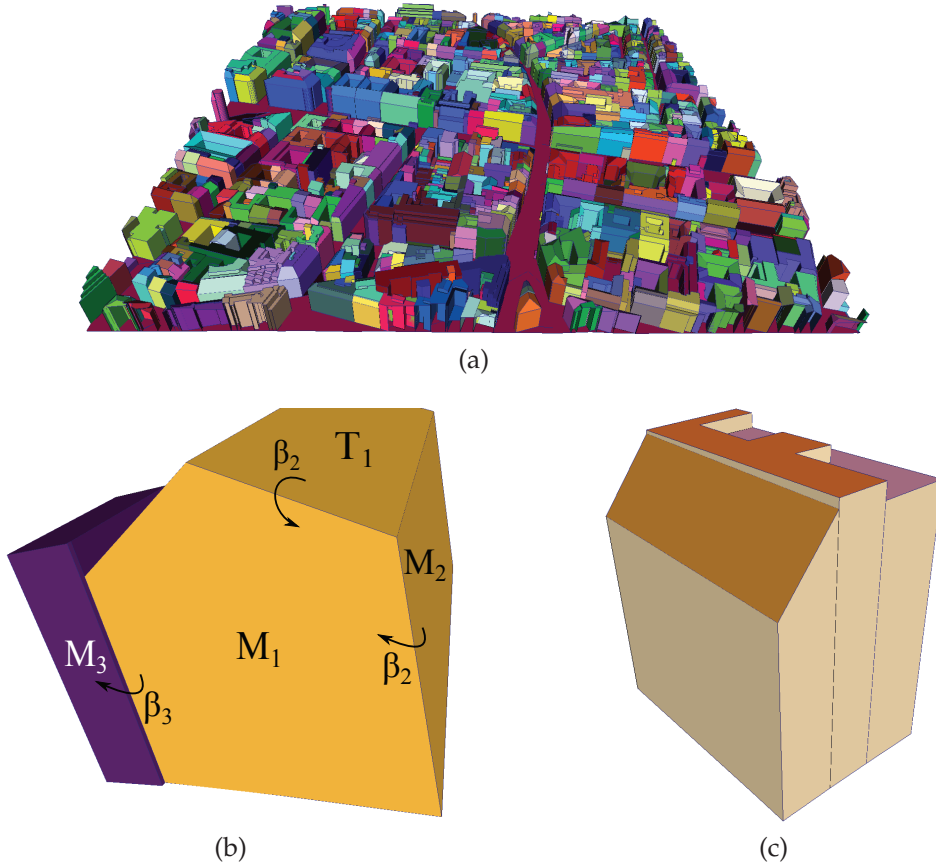


FIGURE 88 – (a) Résultat de la reconstruction topologique sur un échantillon de modèle 3D de la ville de Paris. (2) La navigation d'une cellule à l'autre en utilisant les liens β_i . (c) Exemple d'un complexe de bâtiment composé de 3 volumes.

Conformément à la description géométrique fournie par les données, la reconstruction topologique nous donne ici une description surfacique des éléments des bâtiments. Ainsi, une 3-cellule dans C_S correspond à une partie d'un bâtiment, un bâtiment entier ou éventuellement un ensemble de bâtiments. Pour cette raison, contrairement aux modèles BIMs, les informations significatives sont maintenant associées aux faces et non aux volumes. Chaque 2-cellule de C_S représente ainsi une partie d'un bâtiment, qui est soit un mur, soit un toit. Par ailleurs il y a en dehors des bâtiments le sol qui lui aussi correspond à une seule 3-cellule. La sémantique est donc associée à chaque 2-cellule de C_S via des 2-attributs conte-

nant l'étiquette sémantique de l'élément.

Similairement aux modèles BIMs, C_S forme aussi une seule composante connexe avec toutes ses cellules interconnectées. Ainsi β_2 lie soit deux murs, deux toits, deux sols, un mur et un toit ou encore un mur et un sol et β_3 constitue le lien qui lie deux bâtiments voisins. Il est aussi important de noter que dans C_S , un bâtiment peut tout aussi bien correspondre à un ensemble de volumes connectés. En effet, les toits séparés peuvent conduire à une rupture du même bâtiment en plusieurs volumes distincts. Nous appelons *complexes de bâtiments* ce type de groupes de volumes censés représenter un seul bâtiment (cf. figure 88c) et nous abordons cette question par la suite en procédant à un regroupement des volumes suivi d'une extraction de la façade.

4.2.2 Identification des composants SIG

Dans un modèle de ville de LoD2, il y a seulement quelques éléments de bâtiment qui sont intéressants à identifier, à savoir les toits, les murs, le sol et les façades. Notre objectif est ici d'extraire ces caractéristiques du modèle et de les étiqueter en utilisant les attributs d'une 3-carte. Dans une première étape, nous allons identifier les 2-cellules à considérer comme des toits avant de propager l'étiquetage sémantique aux murs et aux sols.

Identification des toits et murs

Similairement à ce qui a été réalisé pour les BIMs, il est nécessaire d'être en mesure d'identifier un élément de départ dans le modèle, de manière à initialiser le processus de propagation de l'information sur le restant des éléments. À ce stade, aucune 2-cellule de C_S ne porte d'étiquette sémantique, donc $\forall b \in B_S$, $2\text{-attr}(b) = \emptyset$. Nous allons dans un premier temps procéder à l'étiquetage des 2-cellules qui correspondent aux toitures et aux murs. Le niveau de détails des modèles SIG dont nous disposons n'étant pas élevé, la règle heuristique nécessaire pour identifier les toits est simplement basée sur la vérification de l'orientation de la normale des 2-cellules concernées. Une fois identifiés, les toits nous aideront à reconnaître et étiqueter les murs. Soit \vec{N} le vecteur normal de $2\text{-cell}(b)$, si nous considérons $\theta_{\vec{z}, \vec{N}}$, l'angle formé par \vec{N} et l'axe \vec{z} alors :

$$(9) \ 2\text{-attr}(b) = \text{"toit"} \text{ si } \theta_{\vec{z}, \vec{N}} \in [0, \frac{\pi}{4}] ;$$

$$(10) \ 2\text{-attr}(b) = \text{"mur"} \text{ (si } 2\text{-attr}(b) = \emptyset \text{ et } 2\text{-attr}(\beta_2(b)) = \text{"toit"}) ; \\ \text{ou (si } \theta_{\vec{z}, \vec{N}} = \frac{\pi}{2} \text{)}.$$

Dans la règle (9), l'intervalle angulaire choisie pour $\theta_{\vec{z}, \vec{N}}$ permet de couvrir aussi bien les toits plats que ceux en pente, comme illustré dans la figure 89. Il

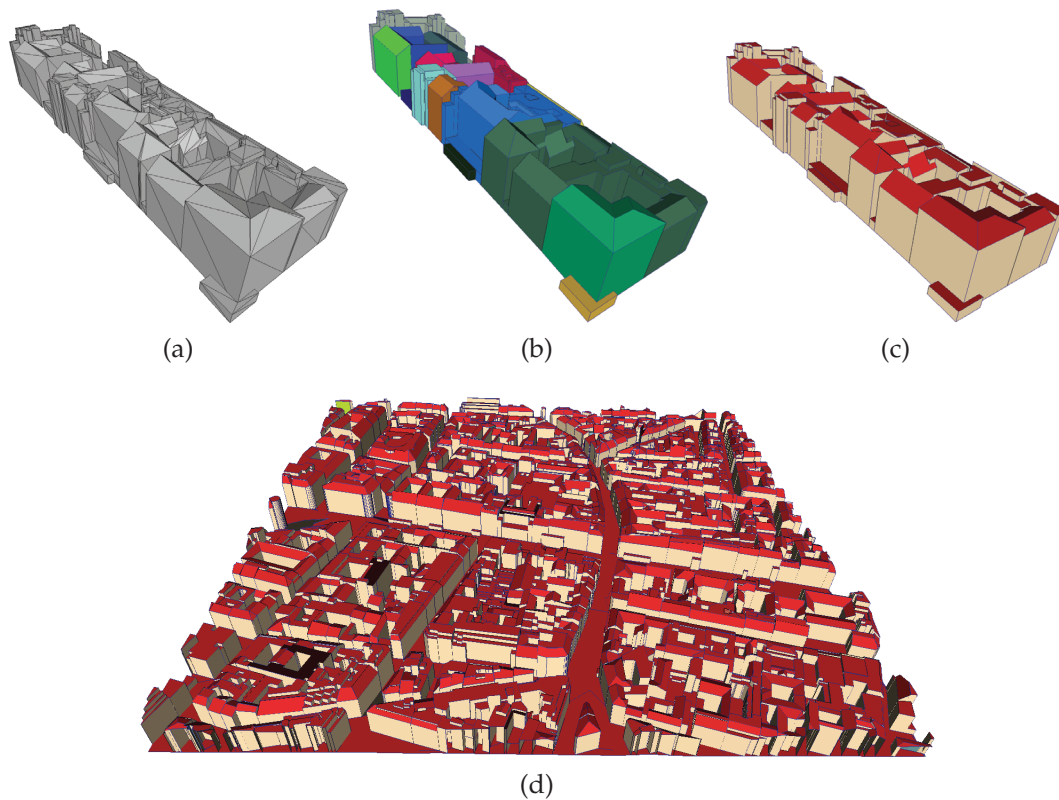


FIGURE 89 – (a) Soupe de triangles correspondant aux données SIG d'un quartier. (b) Résultat après la reconstruction topologique. (c) Résultat de l'étiquetage sémantique, avec les toits en rouge et les murs en beige. (d) Étiquetage sémantique sur une dalle représentant une partie de la ville de Paris.

s'agit là d'un critère dépendant du modèle, car l'inclinaison des toits en pente dépend elle même de nombreux paramètres (position géographique des maisons, environnement, etc.). En revanche, l'intervalle implique que même les 2-cellules du sol sont étiquetées comme des toits (cf. figure 89d), mais ceci sera corrigé dans les étapes suivantes.

La première partie de la règle (10), quant à elle, dit que toute 2-cellule sans étiquette et qui est liée à un toit par β_2 représente un mur. Ceci est une heuristique cohérente sur nos données en raison de leur processus de production (cf. section 4.2). La deuxième partie de la règle est nécessaire pour traiter le cas des murs verticaux découpés en plusieurs 2-cellules. Cette découpe s'explique par l'opération de création des liens β_3 lors de la reconstruction topologique (cf. section 3.4.2). Dans ce cas, certaines 2-cellules verticales pourraient ne pas être sémantiquement identifiées par la première partie de la règle (10) car n'étant pas liées par β_2 aux toits. Les figures 89c et 89d montrent les résultats obtenus à l'issue de cette étape, à savoir un modèle dans lequel toutes les 2 cellules sont

soit étiquetées comme "toit" soit comme "mur". Nous pouvons alors procéder à l'identification de la surface du sol.

Identification du sol

Le sol est nécessaire pour un grand nombre d'opérations de simulation (simulation d'inondation, tremblement de terre, etc.). Dans un modèle de LoD2, il peut être intuitivement décrit comme la plus grande surface (en aire), ayant majoritairement des parties horizontales et se situant à la hauteur la plus basse dans le modèle. Il est cependant peu probable d'avoir une surface plate et régulière sur tout le terrain (sauf au niveau des routes ou des installations particulières). Ainsi le sol peut être composé de plusieurs 2-cellules adjacentes. Ces 2-cellules sont pour le moment étiquetées comme étant des toits du fait de la règle (9). Nous proposons donc une règle pour les corriger. Nous considérons tout brin $b \in B_S$ tel que $2\text{-attr}(b) = \text{"toit"}$:

- (11) $2\text{-attr}(b) = \text{"sol"}$ (si $2\text{-cell}(b)$ est la plus grande 2-cellule à la plus basse hauteur suivant \vec{Z} ;
ou (si $\exists b' \in 3\text{-cell}(b)$ tel que $2\text{-attr}(b') = \text{"sol"}$)).

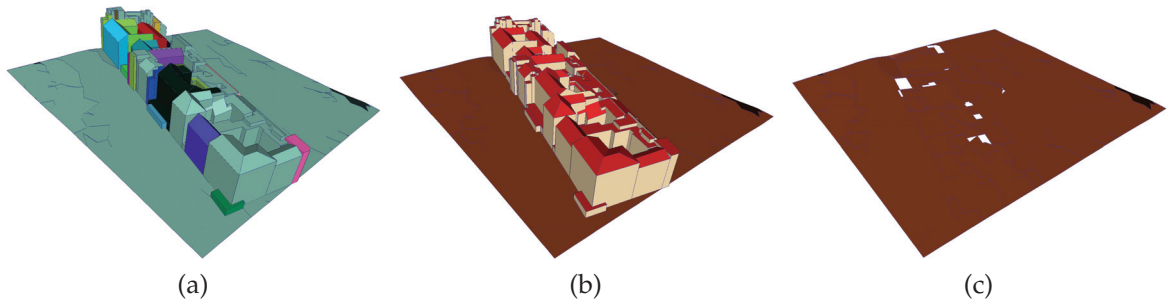


FIGURE 90 – (a) Représentation résultante de la reconstruction topologique du modèle initial. (b) Les toits, murs et sol identifiés. (c) 2-cellules de sol isolées.

L'opération de prétraitement qui consiste à fusionner les faces coplanaires (cf. section 3.3.5) contribue de manière considérable à la fortification de l'hypothèse de la première partie de la règle (11). En effet, sans ce prétraitement, la considération de la plus grande face ne serait pas un critère pertinent. La seconde partie de la règle est une conséquence directe de la première partie, car une fois la plus grande 2-cellule du terrain identifiée, l'information est diffusée à ses 2-cellules voisines appropriées. Ainsi, une 2-cellule initialement identifiée comme un "toit" et qui possède un brin 2-cousu avec le brin d'une autre 2-cellule de type "sol", verra son attribut sémantique devenir également "sol". La figure 90 montre le résultat sur un quartier entouré d'un terrain vague.

Il peut arriver que certaines faces, pourtant situées au niveau du sol, ne soient pas identifiées comme tel, car n'ayant aucun 2-lien avec les autres 2-cellules "sol". Cela s'explique par le fait que ces faces sont 2-cousues à des 2-cellules "mur" et sont à l'origine des trous que nous pouvons distinguer dans la figure 90c. Les bâtiments d'un modèle LoD2 n'ayant pas de plancher, une simple passe de correction changeant la sémantique des 2-cellules "toit" situées en dessous de ces murs permet de corriger leur sémantique.

Identification des complexes de bâtiments et des façades :

La notion de façade pour un bâtiment dans un modèle SIG de ville virtuelle reste la même que pour un bâtiment de type BIM, à savoir tous les éléments en contact avec l'extérieur ou avec un autre bâtiment. Il ne s'agit donc pas uniquement du côté frontal d'un édifice. Cependant le principal problème des modèles LoD2 est la sur-décomposition des volumes supposés représenter les bâtiments. En effet, du fait des méthodes de construction des modèles, chaque toit voit tous ses côtés extrudés jusqu'au sol à l'image des exemples des figures 88c et 91, résultant sur des complexes de bâtiments.

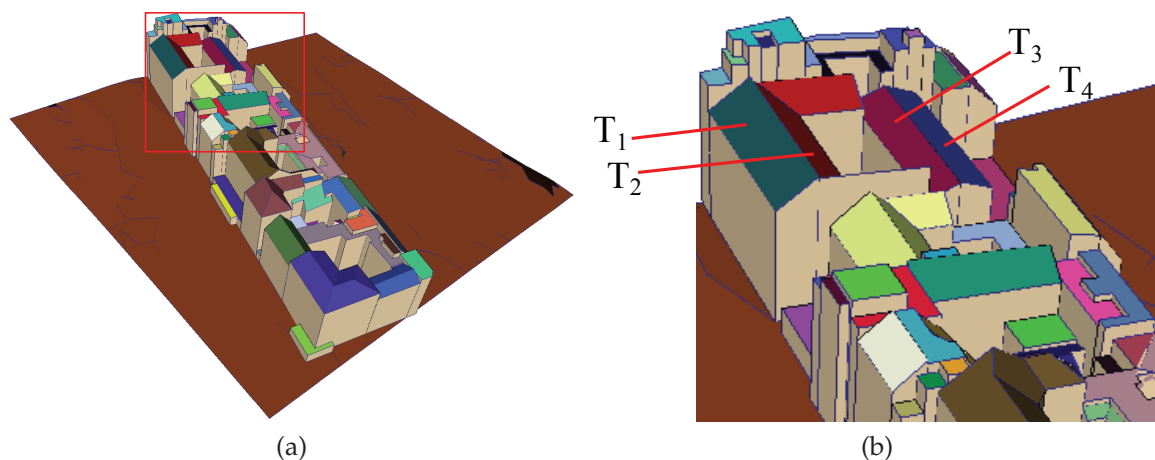


FIGURE 91 – Mise en évidence de la sur-décomposition bâtiments. (a) Chaque couleur de toit représente un toit entouré par des murs à chaque extrémité. (b) Zoom permettant de voir par exemple que les couples de toits $\{T_1, T_2\}$, ou $\{T_3, T_4\}$, appartiennent aux mêmes bâtiments.

Dans la figure 91a, le toit de chaque bâtiment est représenté avec une couleur aléatoire. En regardant ce modèle de plus près, il est aisé de constater que bon nombre de toits qui devraient partager la même couleur présentent des couleurs différentes (cf. figure 91b). Cela exprime la sur-décomposition du modèle avec plusieurs 3-cellules différentes qui ne devraient constituer qu'un seul et même

volume. Cependant, les données initiales ne contiennent pas suffisamment d'informations pour permettre un regroupement adéquat des volumes en complexes de bâtiments. De ce fait, il est nécessaire de définir des règles de regroupement des 3-cellules représentant les bâtiments dans C_S afin d'être en mesure d'identifier de manière plus pertinente leurs façades. Au départ, chaque 3-cellule appartient à son propre groupe. Considérons deux groupes c_1 et c_2 :

- (12) c_1 et c_2 sont regroupés si $\exists b_1 \in c_1$ et $\exists b_2 \in c_2$ tel que $\beta_3(b_1) = b_2$;
 $2\text{-attr}(\beta_2(b_2)) = \text{"toit"}$, $2\text{-attr}(\beta_2(b_1)) = \text{"mur"}$;
 et $\exists b' \in 2\text{-cell}(\beta_2(b_1))$ tel que $2\text{-attr}(\beta_2(b')) = \text{"toit"}$;
 et si l'_1 la hauteur de $2\text{-cell}(\beta_2(b_1))$ est telle que $l'_1 \leq \text{dist}$, avec dist une distance prédéfinie.

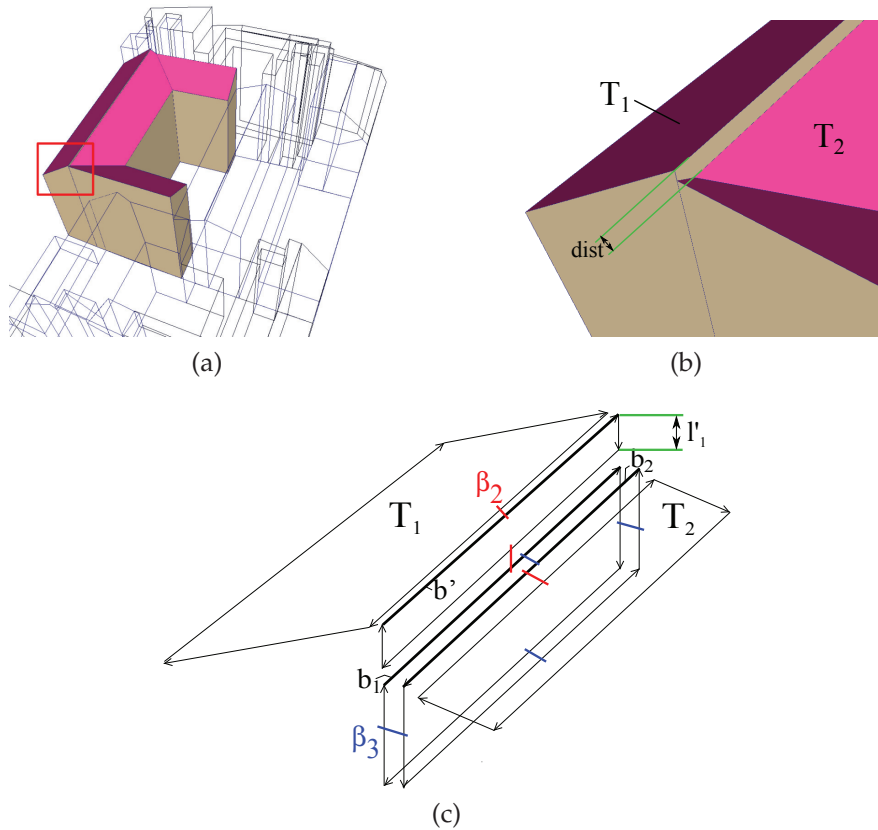


FIGURE 92 – (a) Les deux 3-cellules possédant les toits T_1 et T_2 de la figure 91b. (b) Zoom permettant de voir le gap à l'origine de la division entre les deux 3-cellules. (c) 3-carte illustrant l'application de la règle (12) au niveau de la zone de contact entre les deux volumes.

La règle (12) permet de regrouper les bâtiments quand leurs toits sont séparés par de petits espaces qui pourraient être les conséquences, soit de problèmes

Appliquée à tout C_S , les 3-cellules correspondantes à cette configuration sont détectées puis regroupées dans les mêmes complexes de bâtiments. Un seuil approprié peut permettre de résoudre directement le cas des bâtiments conçus avec des toits de différents niveaux de hauteur. Une fois de plus, la règle (12) constitue simplement un exemple de ce qui pourrait être défini, mais ne constituera sans doute pas une règle absolue pour avoir un regroupement parfaitement cohérent sur tout le modèle. Il est possible d'introduire d'autres règles afin de traiter d'autres cas particuliers. De plus, en cas de données complémentaires, de type cadastre par exemple, un partitionnement plus pertinent pourrait facilement être mis en place.

(13) $2\text{-attr}(b) = \text{"façade"}$ (si b est 3-libre) ;
ou (si $b \in c_i$ et $\beta_3(b) \in c_j$ avec $c_i \neq c_j$).

Grâce à toutes les opérations que nous avons présenté jusque là, nous sommes en mesure de faire de tous nos modèles de départ qui ne contenaient que de l'information géométrique, des modèles riches en informations topologiques et

sémantique. La reconstruction topologique permet dans un premier temps de procéder à la subdivision des modèles en composants significatifs des bâtiments représentées puis à lier explicitement ces composants entre eux en s'aidant des opérations des 3-cartes. Ensuite la reconstruction sémantique permet d'étiqueter tous les composants des modèles à travers la définition de règles heuristiques propagé par le biais des liens topologiques. À présent, nous disposons donc de modèles assez riches en information pour procéder à leurs exploitation dans le cadre d'opérations de simulations. Dans le chapitre suivant, nous explorons au préalable un ensemble d'expérimentations permettant de tester les approches que nous avons proposé et nous présentons des exemples d'applications exploitants ces données BIMs ou SIG.

La sagesse ne peut venir que de l'expérience.

— Morihei Ueshiba

Sommaire

5.1	Prétraitements	131
5.1.1	Fusion des 0-cellules Proches	131
5.1.2	Suppression des 2-cellules dégénérées	132
5.1.3	Suppression des Clones	134
5.1.4	Fusion des 2-cellules coplanaires	134
5.2	Reconstruction Topologique	136
5.2.1	Résultats de la Reconstruction des Liens β_2	137
5.2.2	Résultats de la Reconstruction des Liens β_3	139
5.2.3	Problèmes sur les données BIM	142
5.2.4	Problèmes sur les données SIG	146
5.2.5	Impact du Choix des Marges d'Erreur ϵ	148
5.3	Étiquetage Sémantique	150
5.4	Extraction d'Information pour de la Simulation Acoustique . .	155
5.4.1	Modèle des Plaques Minces (MPM) pour l'Acoustique . .	156
5.4.2	Informations Requises pour AcouBAT	156
5.4.3	De l'EBM-LCC au MPM	157
5.5	Extraction d'Information pour du Lancer de Rayons	161
5.5.1	Partition Contrainte Convexe de l'Espace (CCSP) pour le lancer de rayons	162
5.5.2	Informations requises pour le lancer de rayons	163
5.5.3	De l'EBM-LCC au CCSP	164
5.5.4	Performances du lancer de rayons	165
5.6	Extraction Automatique de Niveaux de Detail	167
5.6.1	Extraction de LoD3 à partir de modèles BIM	168
5.6.2	Extraction de LoD2 et LoD1 à partir de Modèles BIM . .	169

Nous présentons dans ce chapitre un ensemble d'expériences visant à fournir des résultats validant nos différentes approches d'enrichissement de modèles 3D de bâtiments. Nous avons testé nos opérations sur différents types de fichiers à savoir des Collada (*.dae) et des IFC (*.ifc) pour les BIM, et des OBJ (*.obj) pour ce qui concerne les modèles SIG. Nous rappelons que par "modèles de type BIM", nous faisons référence à des modèles dans lesquels la représentation des composants des bâtiments est faite de manière volumiques. À l'opposée, nous considérons les modèles dont les composants sont surfaciques comme étant des modèles de type SIG. Nous proposons donc l'étude de chaque étape du processus d'enrichissement, allant des prétraitements à la reconstruction sémantique, sur un ensemble de modèles aux caractéristiques différentes. Nos algorithmes ont été implémentés en utilisant la bibliothèque CGAL qui inclue des packages dédiés aux cartes combinatoires et aux LCC. D'autres packages comme celui des arrangements 2D nous aussi été d'une grande utilité. Tous les tests (sauf précision) ont été effectués sur un ordinateur portable avec un processeur Intel Core i7-2760QM 2.40 GHz et 8Go de mémoire RAM. Par ailleurs, pour l'ensemble des tests (sauf précision) nous fixons les valeurs suivantes pour les marges d'erreur : $\epsilon_{eg} = 10^{-3}$, $\epsilon_{cop} = 10^{-3}$ et $\epsilon_{ang} = 5$.

Nous avons nous même produit certains modèles de test avec le modelleur SketchUp 8 ©, car malgré l'abondance des modèles présents dans la banque de données en ligne du même éditeur [146], il est très difficile de trouver un modèle dont les composants sont convenablement représentés. Nous qualifions ainsi ces modèles de *modèles contrôlés*, dans la mesure où nous avons nous même veillé à la bonne description des objets qu'ils représentent. Nous considérons donc les autres comme des *modèles non contrôlés*. En ce qui concerne les modèles SIG dont nous disposons, ce sont des données de type LoD2 qui ont été extraites de fichiers CityGML. Ils ne présentent donc aucun détail intrinsèque des constructions représentées et aucun détail sur les façades des bâtiments si ce ne sont les toits.

Tous les formats que nous avons utilisé, à l'exception des IFC, encodent habituellement les données géométriques qu'ils renferment par le biais de faces triangulaires. Cependant, les fichiers IFC dont nous avons fait usage contiennent également une description géométrique de type B-Rep, majoritairement composée de triangles décrivant les composants du modèle. Par ailleurs, aucune information topologique ou sémantique contenu dans ces modèles n'est exploitée. Nous présentons par la suite les résultats des prétraitements sur ces modèles, ensuite nous verrons les résultats obtenus avec les deux approches de reconstruction topologique, avant de passer à l'étiquetage sémantique de leurs composants.

5.1 PRÉTRAITEMENTS

La première phase après le chargement des données consiste à effectuer les opérations de prétraitements. Ces opérations permettent de supprimer une importante partie des problèmes inhérents aux modèles 3D traités. Nous procédons à leur application dans l'ordre suivant :

- fusion des 0-cellules proches ;
- suppression des 2-cellules dégénérées ;
- correction des 2-cellules complexes ;
- suppression des clones ;
- fusion des 2-cellules coplanaires.

Le tableau 3 présente les caractéristiques de trois modèles : un de type BIM au format Collada et réalisé par nos soins (*Office*), un modèle au format IFC (*Im-Bureau*) et un dernier de type SIG (*Paris-LoD2*).

Modèles	Formats	Nb de faces	Nb de brins
<i>Office</i>	.dae (BIM)	5556	16668
<i>Im-Bureau</i>	.ifc (BIM)	32298	97128
<i>Paris-LoD2</i>	.obj (SIG)	55378	166134

TABLE 3 – Caractéristiques des modèles 3D présentés dans la figure 93. Le modèle collada (.dae) a été produit par nous même, l'ifc nous a été fournit par le CSTB et l'obj a été extraits à partir de fichiers CityGML. La dernière colonne correspond au nombre de brins créés dans les EBM-LCC au chargement des modèles.

La figure 93 donne une illustration des modèles au chargement dans notre outil. Nous pouvons ainsi y constater aisément la description des faces par des triangles sur tous les modèles. Cela explique le rapport de $3n$ brins pour n faces au chargement, excepté pour le modèle *Im-Bureau* dont certaines faces sont polygonales. Cette description triangulaire des surfaces rend l'opération de correction des 2-cellules complexes non nécessaire, raison pour laquelle elle sera ignorée. Nous présentons dans les sous sections suivantes chacune des autres étapes de prétraitement sur ces trois modèles tout en discutant les résultats obtenus.

5.1.1 Fusion des 0-cellules Proches

L'opération de fusion des 0-cellules proches consiste à déplacer des sommets d'un modèle aux coordonnées numériquement très proches afin de leur affecter la même position (cf. section 3.3.1). Cela permet de réduire considérablement les

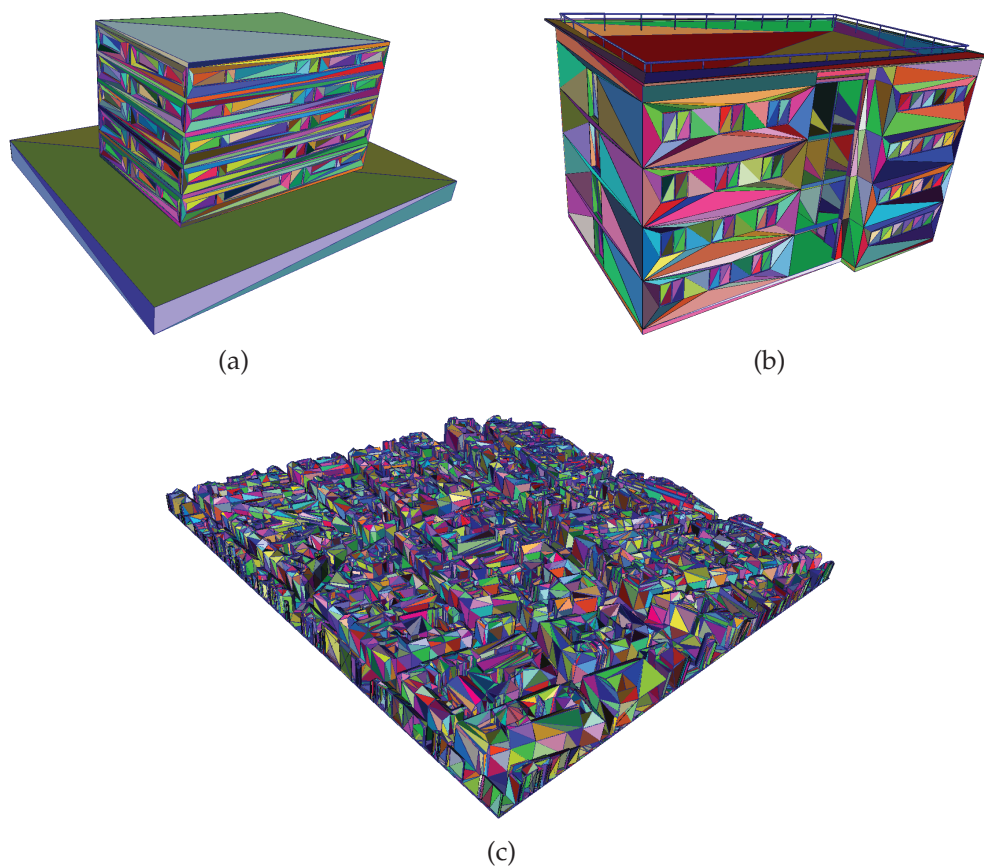


FIGURE 93 – Modèles utilisés pour tester les opérations de prétraitement. Pour les caractéristiques, voir tableau 3. (a) *Office*. (b) *Im-Bureau*. (c) *Paris-LoD2*.

erreurs d'arrondi qui surviennent pendant la reconstruction topologique.

Le tableau 4 expose les résultats de cette opération et montre à quel point elle agit sur les sommets des modèles. En effet il apparaît qu'en moyenne 85.5% des sommets sont corrigés par cette opération, quel que soit le type de modèle concerné. Cela permet d'avoir une idée de l'ampleur qu'occupent les problèmes d'imprécision numériques dans les données décrites par les modèles 3D. Puisque l'opération ne modifie que les 0-attributs des 0-cellules afin de les déplacer, le nombre de brins reste inchangé par rapport au modèle de départ. Par ailleurs le processus se déroule en temps linéaire, permettant ainsi de traiter même des gros modèles en moins d'une seconde, comme par exemple sur *Paris-LoD2* où l'opération se déroule en 42,07ms.

5.1.2 Suppression des 2-cellules dégénérées

Cette opération permet de débarrasser les modèles de leurs 2-cellules qui présentent une surface nulle, ou quasi-nulle (cf. section 3.3.2). Le tableau 5 corres-

Modèles	Nb de points corrigés	Nb de Brins restants	Temps (ms)
<i>Office</i>	14252 (85,5%)	16668	3,7
<i>Im-Bureau</i>	85617 (88,15%)	97128	38,11
<i>Paris-LoD2</i>	139157 (83,76%)	166134	42,07

TABLE 4 – Résultats des opérations de correction des positions des sommets dans les modèles. Ces derniers sont tous très fortement concernés par l'opération.

pond aux résultats du traitement de ces faces dégénérées. Le modèle *Office* que nous avons conçu nous même et le modèle SIG *Paris-LoD2* s'avèrent être les moins touchés par ce type de problèmes, moins de 1% de leurs faces sont concernées. À l'opposé, elles sont présentes en nombre important dans *Im-Bureau* (8,21% des faces du modèle). Cela s'explique principalement par la présence d'objets très détaillés dans ce modèle comme les portes et fenêtres, ou encore les rampes de toit ou d'escalier. En effet ces types d'objets sont souvent de très petite taille à l'échelle de tout l'immeuble qui les contient et ils sont constitués par de nombreuses faces. Le choix d'un bon ϵ_{eg} , capable de prendre en compte les faces des grands objets comme celles des petits est donc nécessaire.

Modèles	Nb de faces dégénérées	Nb de Brins restants	Temps (ms)
<i>Office</i>	44 (0,79%)	16536	1,8
<i>Im-Bureau</i>	2653 (8,21%)	89169	20,08
<i>Paris-LoD2</i>	1 (~ 0%)	166131	39,163

TABLE 5 – Tableau donnant le nombre de faces dégénérées détectées dans les modèles traités. Ces faces sont supprimées du EBM-LCC.

Puisque les faces dégénérées détectées sont supprimées de l'EBM-LCC, le nombre de brins diminue en conséquence. Les chiffres de la colonne 2 permettent d'ailleurs de constater que seule des faces triangulaires (donc décrite par trois brins de la 3-carte) ont été retirées, respectant ainsi la relation $n'_b = n_b - 3n$, avec n le nombre de faces dégénérées retirées, n_b le nombre de brins avant retrait des n faces et n'_b le nombre de brins restant. Par ailleurs, cette opération nécessitant de vérifier toutes les faces, son temps d'exécution dépend du nombre total de faces que contient le modèle et non du nombre de faces dégénérées uniquement.

5.1.3 Suppression des Clones

Cette opération de prétraitement permet de supprimer les faces doublons qui n'apportent aucune information supplémentaire par rapport à leur originale (cf. section 3.3.4). Le tableau 6 expose le nombre de clones détectés parmi les faces de nos modèles de test. Nous constatons que seuls *Im-Bureau* et *Paris-LoD2* constituant les plus grands modèles en contiennent. Mais leur proportion reste faible (moins de 3%), ce qui permet de pouvoir les supprimer sans altérer le modèle de manière importante. Ici aussi, le temps de calcul est linéaire par rapport au nombre de faces à traiter et le nombre de brins diminue avec les faces supprimées, sauf pour *Office* qui ne contient aucun clone.

Modèles	Nb de clones détectés	Nb de Brins restants	Temps (ms)
<i>Office</i>	0 (0%)	16536	~ 0
<i>Im-Bureau</i>	939 (2,91%)	86286	49,38
<i>Paris-LoD2</i>	928 (1,67%)	163347	94,75

TABLE 6 – Résultats des opérations de suppression de clones. Le nombre de clones détectés donne une idée de leur présence en nombre peu important dans les modèles.

5.1.4 Fusion des 2-cellules coplanaires

La dernière opération consiste à simplifier les surfaces des modèles en fusionnant leurs faces coplanaires car une description très fine de leurs surfaces n'est pas utile pour la reconstruction topologique. (cf. section 3.3.5). Le tableau 7 montre le nombre de faces restantes à l'issue de l'opération de fusion. Ainsi cette phase permet de réduire au minimum possible le nombre total de faces nécessaires pour décrire les modèles. L'impact est important sur tous les modèles, mais surtout sur ceux qui comptent le plus de faces comme par exemple *Paris-LoD2* avec 76,72% de réduction du nombre de faces. Cela explique le temps plus important passé par cette opération sur ce modèle (48,58s) comparé à *Office* (48,37ms) et *Im-Bureau* (49,38ms) qui voient leurs faces fusionnées en moins de 50ms. La complexité du processus dépend ainsi du nombre de faces à fusionner.

La phase des prétraitements s'achève ainsi avec cette opération et permet de débarrasser les modèles d'une bonne partie de leurs défauts et d'en corriger d'autres. La figure 94 illustre les modèles issus de cette phase et qui sont caractérisés par un nombre de faces et brins moins important qu'à l'origine. Nous allons donc étudier, dans la section suivante, les deux approches de reconstruction topologique que nous avons proposé dans le chapitre 3.

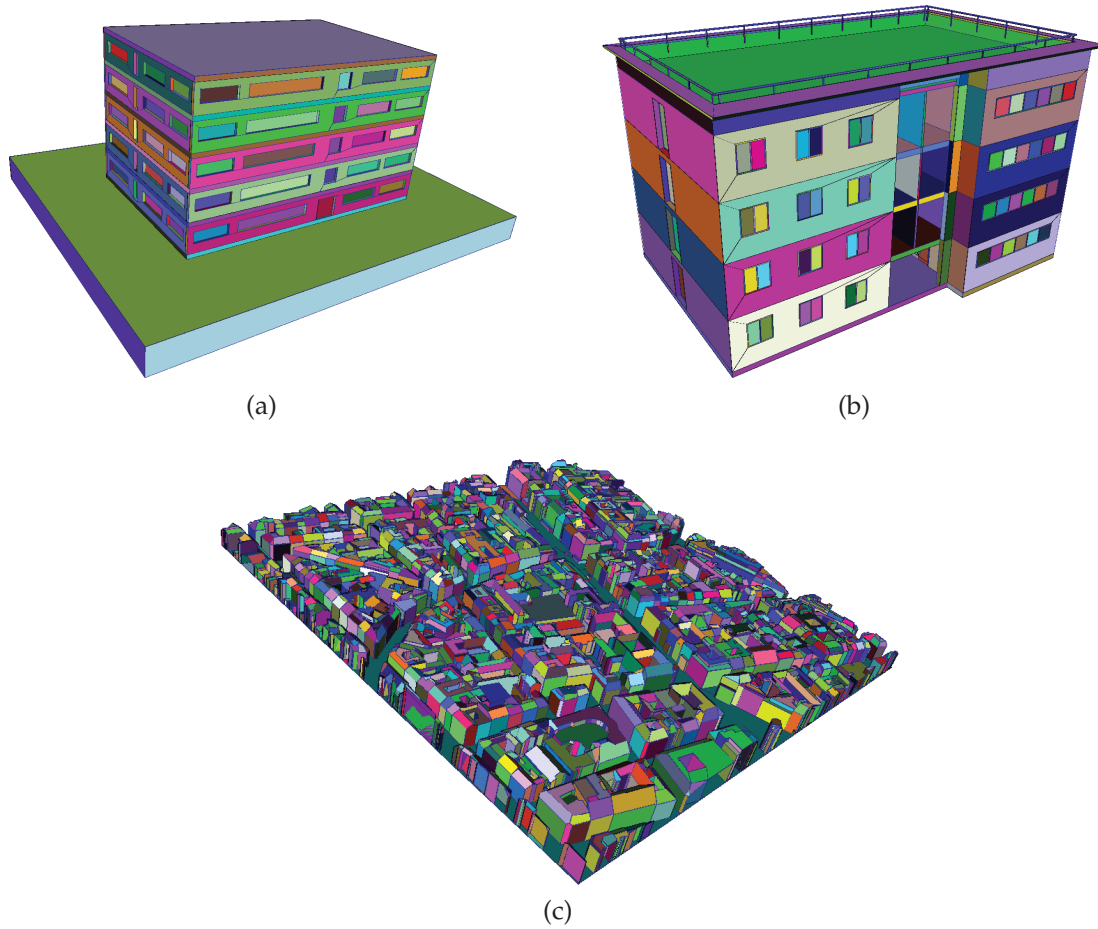


FIGURE 94 – Résultats des prétraitements sur les modèles qui ne sont plus décrits uniquement avec des faces triangulaires. Chaque couleur détermine une face du modèle. (a) *Office*. (b) *Im-Bureau*. (c) *Paris-LoD2*.

Modèles	Nb de faces restantes	Nb de Brins restantes	Temps
<i>Office</i>	2056 (37,3%)	9624	48,37ms
<i>Im-Bureau</i>	12274 (42.76%)	53488	49,38ms
<i>Paris-LoD2</i>	12675 (23,28%)	75225	48,58s

TABLE 7 – Résultats des opérations de fusion des faces coplanaires. Le nombre de faces restantes indique l'ampleur de la simplification qui a été accompli sur les modèles traités.

5.2 RECONSTRUCTION TOPOLOGIQUE

À partir des modèles nettoyés fournis par les prétraitements, la reconstruction topologique se déroule en deux phases principales :

- la reconstruction des liens β_2 entre les faces ;
- la reconstruction des liens β_3 entre les volumes.

Pour étudier ces opérations, nous utilisons trois modèles supplémentaires présentés dans le tableau 8, en plus des modèles *Office* et *Im-Bureau* déjà présentés dans le tableau 3. Nous avons conçu *S-House* qui est un modèle Collada, *2-Salles* est un autre modèle IFC et *District* un modèle SIG de LoD2.

Modèles	Formats	Nb de faces initial/final	Nb de brins initial/final
<i>S-House</i>	.dae (BIM)	840/340	2520/1516
<i>2-Salles</i>	.ifc (BIM)	442/362	1728/1568
<i>District</i>	.obj (SIG)	4352/585	13056/3743

TABLE 8 – Nombres de faces et de brins initiaux (après chargement) et résultats des prétraitements sur les modèles 3D présentés dans la figure 93.

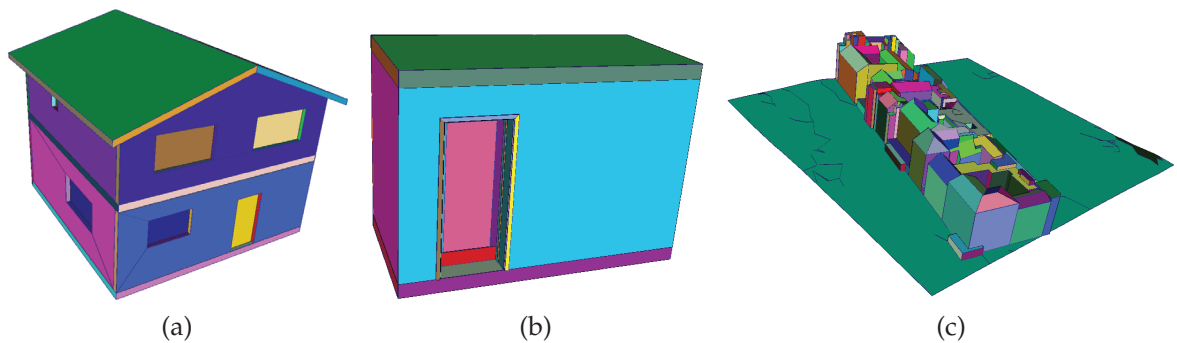


FIGURE 95 – Nouveaux modèles de test issus des prétraitements. (a) *S-House*. (b) *2-Salles*. (c) *District*.

Les tableaux 9 et 10 présentent les résultats des deux méthodes de reconstruction détaillées dans le chapitre 3, à savoir la méthode dite classique (cf. section 3.4) et la méthode avancée, aussi appelée 3SR (cf. section 3.5). Dans cette section nous étudions les résultats de la reconstruction des liens β_2 dans un premier temps, ensuite nous examinons ceux de la reconstruction des liens β_3 .

5.2.1 Résultats de la Reconstruction des Liens β_2

Le tableau 9 est consacré à l'opération de 2-couture entre les faces des modèles. Ainsi, la colonne 2, informant sur le nombre de brins 2-libres, donne une idée du nombre de liens β_2 qui n'ont pas pu être reconstruits convenablement.

Modèles	Nb de faces	Nb de brins 2-libres	Temps (s)
<i>S-House</i>	340	0(0%)	0,08
	2180	0(0%)	0,43
<i>Office</i>	2056	0(0%)	0,34
	15166	0(0%)	20,71
<i>2-Salles</i>	362	110(6,36%)	0.04
	1972	54(1,5%)	0.34
<i>Im-Bureau</i>	14539	8909(15,11%)	1,36
	76840	3650(1,52%)	651,59
<i>District</i>	585	1441(38.5%)	0,01
	5740	3194(16.52%)	7,9

TABLE 9 – Résultats de la reconstruction des liens β_2 sur les modèles des figures 94 et 95. Pour chaque modèle, la première ligne correspond aux statistiques de la méthode classique et la seconde à celles de la 3SR.

La méthode de reconstruction classique affiche un temps d'exécution nettement meilleur que celui de la 3SR sur l'ensemble des modèles étudiés. Par contre elle présente de moins bons résultats sur les *modèles non contrôlés*. Par ailleurs, nous pouvons aussi constater que le nombre de faces que compte les modèles à l'issue de la reconstruction augmente de manière considérable pour la 3SR alors qu'il reste inchangé pour la reconstruction classique. Cela s'explique par une phase de triangulation des surfaces que nous effectuons suite à l'étape des arrangements 2D car ces arrangements peuvent être à l'origine de la création de faces très complexes dans le modèle. Il est possible de réduire le nombre de faces à l'issue de la reconstruction en appliquant une fois de plus l'opération de fusion des faces coplanaires utilisée dans les prétraitements.

Pour nos deux modèles Collada (*S-House* et *Office*), les deux approches montrent de très bons résultats avec 100% des brins 2-cousus, offrant une reconstruction complète de tous les volumes constituant les composants des modèles. La figure 96 permet d'illustrer les modèles reconstruits obtenus. Pour les modèles IFC, aussi bien la reconstruction classique que la 3SR rencontrent des problèmes

empêchant une reconstruction complète. Ainsi les liens β_2 des faces du modèle *2-Salles* sont reconstruits à 93,64% et ceux de *Im-Bureau* à 84,89% par la méthode classique, contre respectivement 98,5% et 98,48% par la 3SR. Cette dernière se présente alors comme étant la méthode la plus adaptée pour traiter les IFC.

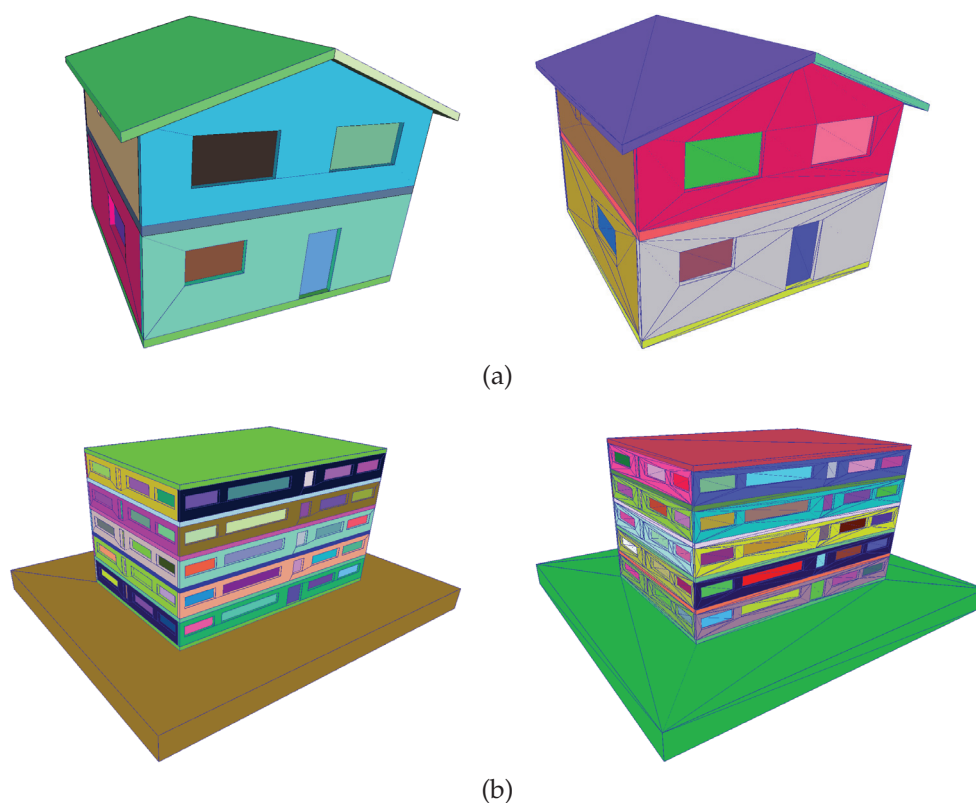


FIGURE 96 – Résultats des 2-coutures sur les modèles Collada ; gauche : résultats de la méthode classique ; droite : ceux de la 3SR produisant des volumes triangulés. Chaque couleur détermine un volume du modèle. (a) *S-House*. (b) *Office*.

Une des principales raisons de ces liens β_2 manquants est le problème de la précision numérique. En effet, les marges d'erreur ϵ que nous définissons ne règlent pas toutes les situations possibles sur un modèle. De plus, du fait que l'approche classique exploite directement les faces issues des prétraitements, elle est plus vulnérable aux problèmes qui y ont échappé. Quant à la 3SR, elle reconstruit toutes les faces dans le cadre des arrangements 2D en exploitant le noyau de calculs exactes de CGAL. Les prédicats géométriques sont alors plus précis, malgré le surcoût que cela engendre sur les temps de calcul, comme pour le modèle *Im-Bureau* par exemple (691,39s). L'autre partie des problèmes est constituée par les faces mal orientées, les intersections volumiques et l'excès de détails dans les modèles (principalement dans les IFC). La section 5.2.3 présente plus de détails sur les problèmes dans les données BIM et la section 5.2.5 discute de l'impact des valeurs ϵ sur la reconstruction.

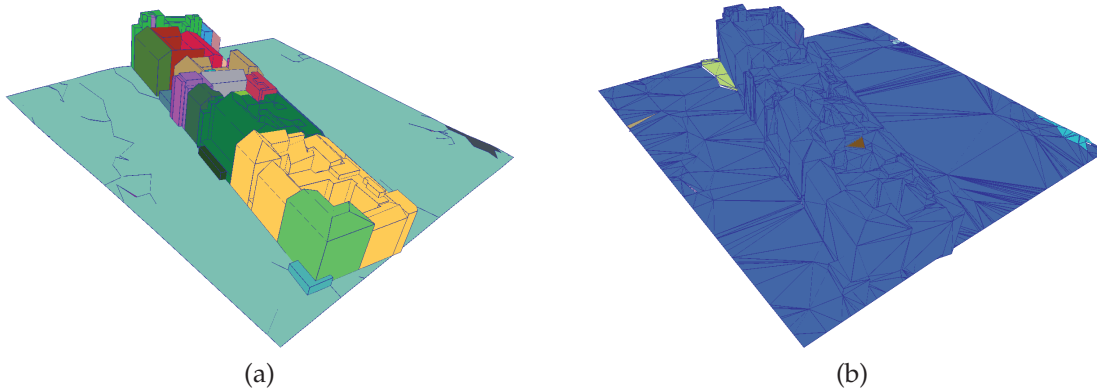


FIGURE 97 – Résultats des 2-coutures sur le modèle *District*. (a) Reconstruction par la méthode classique et (b) par la 3SR.

En ce qui concerne le modèle SIG (*District*), la logique semble être respectée avec un nombre de brins 2-libres moins important à l'issue de la 3SR (16.52%) comparée à la méthode classique (38.5%). Mais en réalité, cette dernière est la mieux adaptée pour reconstruire et représenter les modèles de type SIG du fait de la description géométrique proposée dans ce type de données (cf. figure 97). En effet, la 3SR ayant pour but premier de faire face à des problèmes présents dans les modèles BIM, son processus d'arrangement 2D qui suppose des faces planaires dans le modèle détériore les données SIG qui décrivent souvent des surfaces non plates, comme des terrains par exemple. Notons par ailleurs que les marges d'erreur choisies pour les SIG sont différentes de celles des BIM, avec : $\epsilon_{eg} = 3 \times 10^{-2}$, $\epsilon_{cop} = 10^{-2}$ et $\epsilon_{ang} = 5$. Nous discutons plus amplement des problèmes que présentent les modèles SIG dans la section 5.2.4.

5.2.2 Résultats de la Reconstruction des Liens β_3

Nous étudions dans cette sous section les résultats produits par la reconstruction des liens β_3 entre les volumes de nos modèles à travers le tableau 10. La deuxième colonne nous indique le nombre de composantes connexes qui nous permet de savoir combien de volumes sont isolés du reste de l'EBM-LCC reconstruit. Pour un bâtiment unique, un nombre de composantes connexes égale à 1 signifie que chaque volume du modèle est 3-cousu à au moins un autre volume du même modèle. Ce cas permet de garantir l'accès à n'importe quel composant d'un modèle bâtiment à partir de n'importe quel autre.

En observant le tableau 10, un premier constat est la diminution du nombre de faces après la 3SR comparé à la phase des 2-coutures. Cela est dû à l'opération de fusion des faces coplanaires pouvant être optionnellement effectuée à l'issue de la création des liens β_2 , afin d'enlever la triangulation que cette dernière produit. L'autre constat frappant est le temps insignifiant que requièrent

Modèles	Nb de faces	Nb comp. connexes / Nb volumes	Temps (s)
<i>S-House</i>	391	1/49	0,44
	343	1/49	0,01
<i>Office</i>	2584	1/290	10,44
	2249	1/299	0,04
<i>2-Salles</i>	400	1/54	0,48
	365	1/41	0,003
<i>Im-Bureau</i>	14979	43/1668	41,29
	12147	124/1473	0,17
<i>District</i>	703	17/47	2,32
	2922	23/79	0,001

TABLE 10 – Résultats de la reconstruction des liens β_3 . Pour chaque modèle, la première ligne correspond aux statistiques de la méthode classique et la seconde à celles de la 3SR.

les opérations de 3-couture à l'issue de la 3SR (en moyenne moins de 0,2s). Cette rapidité s'explique par la prédisposition des volumes formés par la 3SR à être directement 3-cousus via les nouvelles faces créées, sans opérations de découpes supplémentaires. Cependant, sur l'ensemble du processus de reconstruction, la méthode classique reste tout de même plus avantageuse au niveau du temps de calcul des 2-coutures et 3-coutures.

Malgré une reconstruction incomplète des liens β_2 entre les faces dans la phase précédente, il est possible d'obtenir une seule composante connexe à l'issue des 3-coutures comme c'est le cas par exemple avec le modèle *2-Salles* (cf. figure 98a). Mais la différence des nombres de volumes reconstruits montre que les deux approches n'offrent tout de même pas une subdivision spatiale similaire. Cette différence dans les subdivisions est illustrée dans la figure 98b où le résultat de la reconstruction de *2-Salles* est affiché. Nous y voyons notamment qu'avec la méthode classique, il se crée par exemple un volume qui fusionne un mur et le plancher, là où la 3SR parvient à bien reconstruire tous les murs, ainsi que le plancher et le toit (cachés pour des raisons de visibilité). Similairement, nous voyons sur la reconstruction du modèle *Im-Bureau* que tous les étages semblent bien reconstruits pour la méthode classique alors que pour la 3SR la subdivision obtenue ne semble pas visuellement pertinente. La dominante couleur bleue du résultat de la 3SR s'explique par la production par cette dernière de l'enveloppe externe au modèle (cf. section 3.5.2). Mais en réalité, les deux méthodes reconstruisent la topologie de manière incomplète, comme le confirme les informations

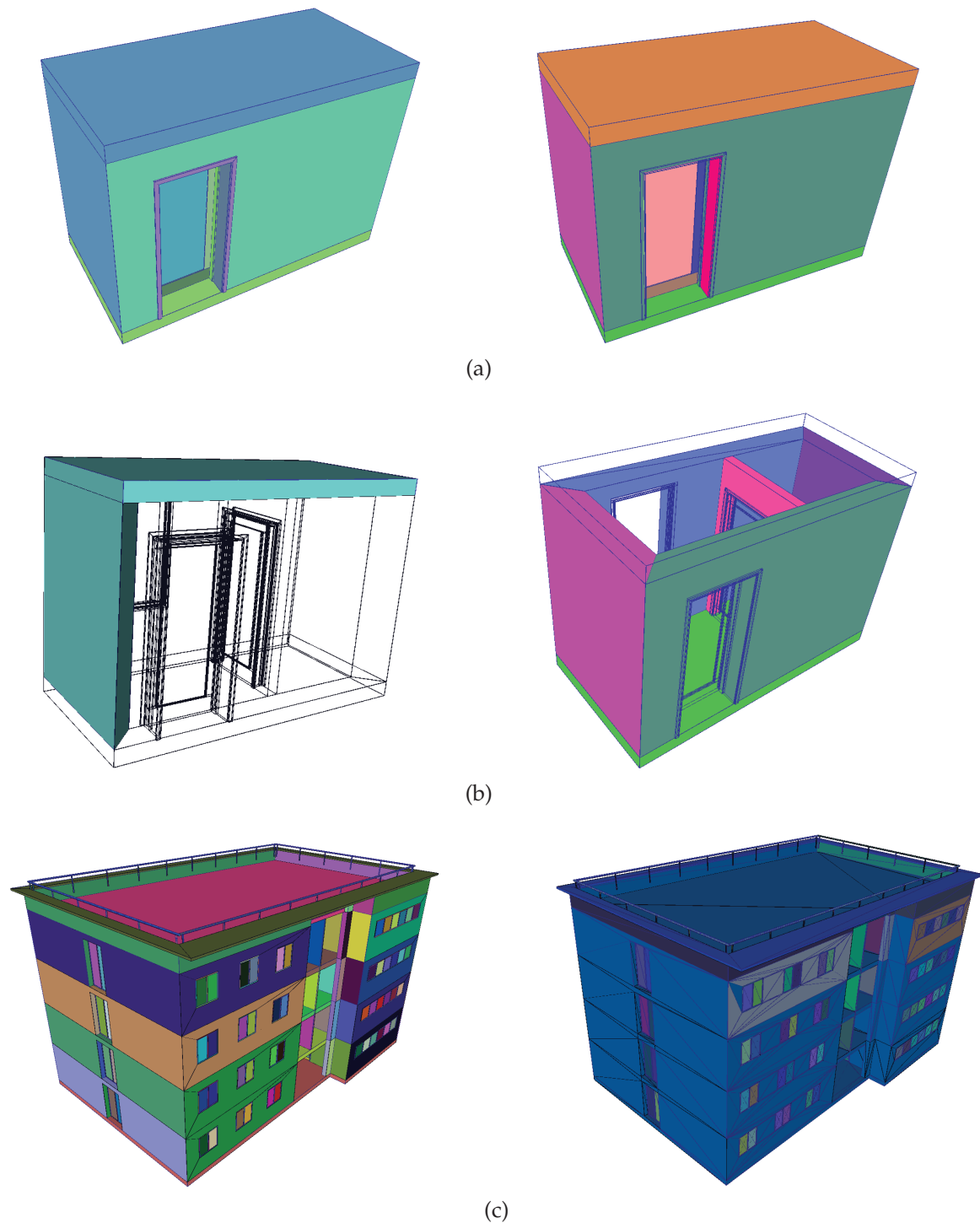


FIGURE 98 – Résultats des 2-coutures suivies des 3-coutures sur les modèles IFC avec à gauche les résultats de la méthode classique et à droite ceux de la 3SR. (a) 2-Salles. (b) Aperçu des différentes subdivisions obtenues en fonction de l'approche utilisée. (c) Im-Bureau.

des tableaux 9 et 10.

Pour les modèles 3D de ville de type LoD2, du fait qu'un volume correspond à une partie d'un bâtiment, un bâtiment entier ou éventuellement un ensemble de bâtiments, et que le modèle peut représenter plusieurs quartiers par exemple, le nombre de composantes connexes peut être supérieur à 1. Sur le modèle *District*, tous les volumes bâtiment ne devraient former qu'une seule composante connexe car ils forment un bloc unique (cf. figure 97). Mais nous obtenons bien plus avec les deux approche du fait de certains problèmes avec le volume correspondant au sol. Les sous sections suivantes discutent plus amplement de tous ces problèmes autour de la reconstruction des *modèles non contrôlés* afin d'apporter plus de détails, d'illustrations et aussi quelques solutions possibles.

5.2.3 Problèmes sur les données BIM

Les modèles IFC *2-Salles* et *Im-Bureau* présentent plusieurs problèmes qui entravent le bon déroulement de la reconstruction topologique. Ces problèmes sont les suivants :

- présence d'objets trop détaillés ;
- présence d'objets flottants ;
- présence de faces mal orientées ;
- présence d'intersection volumiques.

Dans le but de montrer l'importance qu'occupent ce types de détails dans les modèles nous procédons au retrait des ouvertures dans les modèles IFC *2-Salles* et *Im-Bureau*. Il apparait alors que ces détails constituent la plus grande partie des données géométriques décrivant le modèle. Par exemple, *2-Salles* qui compte 442 faces lorsqu'il est chargé avec ses ouvertures en compte seulement 136 lorsqu'il est chargé sans, soit 30,77% de son nombre de faces initial. Similairement, *Im-Bureau* compte 8946 faces sans les ouvertures au lieu des 32298 avec tous ces composants (soit 27,7%). En d'autres termes, environ 70% des géométries de ces modèles concernent des éléments dont nous pouvons nous passer.

Ensuite vient le problème des objets flottants, qui sont en fait des volumes représentés dans le modèle afin d'améliorer son apparence réaliste, mais qui ne sont topologiquement liés à aucun autre volume. Ce sont des objets qui flottent en l'air à l'intérieur du modèle. La figures ?? montre des exemples de ces cas de figures dans le modèle *Im-Bureau*. Par ailleurs, la présence de faces mal orientées et d'intersections volumiques sont des violations des préconditions (P3) et (P4) définies pour les données d'entrée de la reconstruction, dans la section 3.1.1. Pour cette raison, la méthode classique n'est pas en mesure d'opérer correctement en présence de ces deux problèmes, comme illustré par les figures 100c et

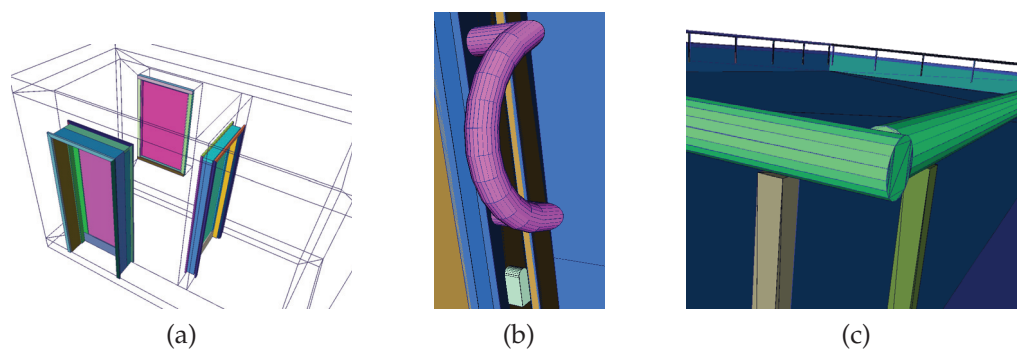


FIGURE 99 – Objets présents dans les modèles et sources de problèmes pour la reconstruction topologique. (a) Portes et fenêtre trop détaillées (IFC). (b) Poignée de porte (Collada). (c) Rampe de terrasse (IFC).

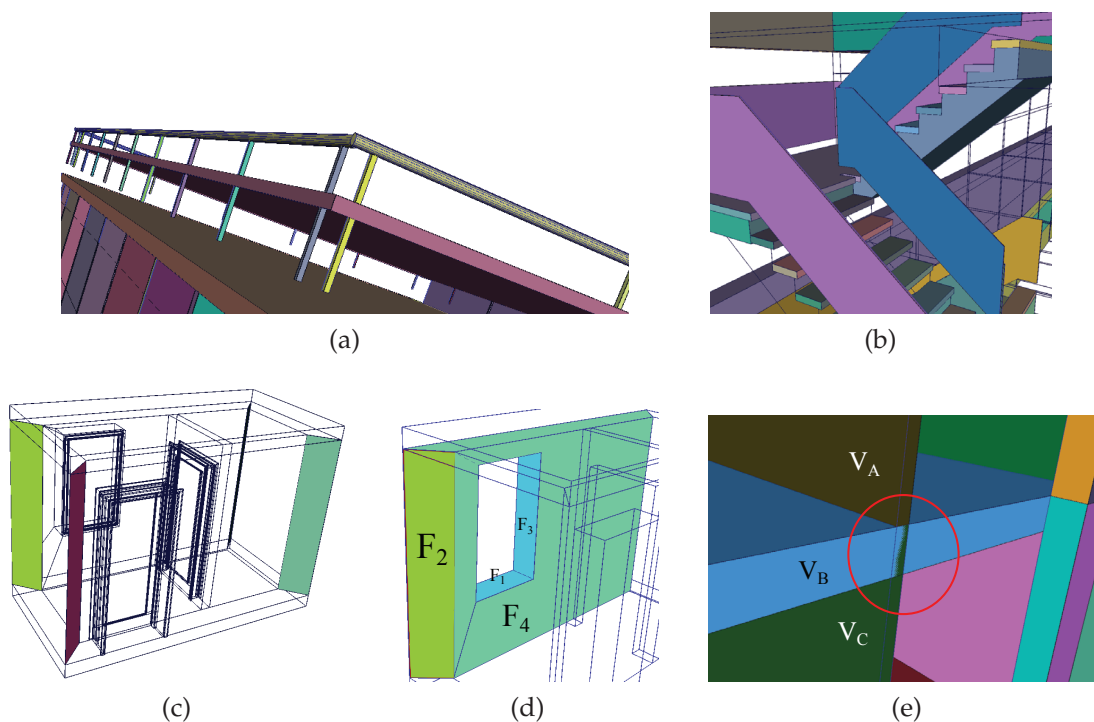


FIGURE 100 – (a) et (b) Les supports des rampes du toit et de escaliers dans *Im-Bureau* sont des volumes flottants. (c) Faces 2-libres situées à l'intersection entre les murs de *2-Salles*, suite à la reconstruction par la méthode classique. (d) Les faces F_1, \dots, F_4 devraient former un seul volume, mais elles ne sont pas 2-cousues pour des problèmes d'orientation incompatibles. (e) Intersection volumique entre deux volumes V_B et V_C , dans *Im-Bureau*.

100d. Quant à la 3SR, elle est capable de gérer les faces mal orientées mais pas les intersections volumiques.

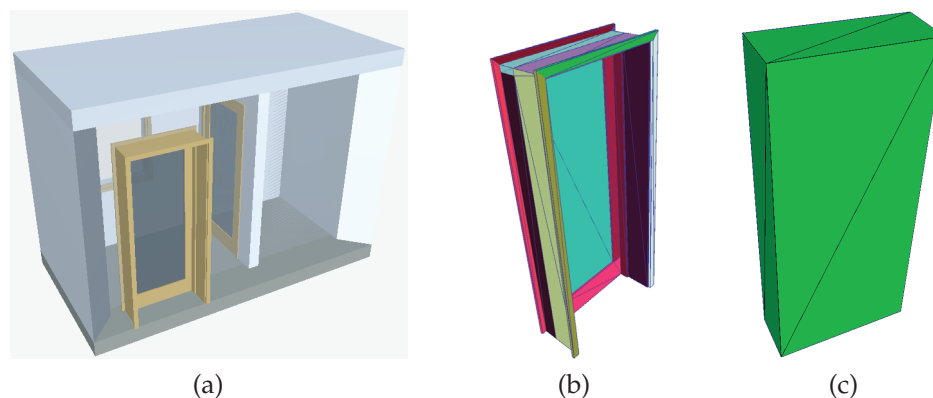


FIGURE 101 – (a) Modèle IFC original de 2-Salles (mur de devant caché). (b) Porte reconstruite par la 3SR (17 volumes combinés). (c) Simplification de la porte en un seul volume.

Modèles	Formats	Nb de faces après prétraitements	Nb de brins après prétraitements
2-Salles-SO	.ifc (BIM)	56	248
Im-Bureau-SO	.ifc (BIM)	2295	11184

TABLE 11 – Caractéristiques des modèles 3D présentés dans la figure 102.

Afin d’être en mesure de traiter convenablement les problèmes liés aux éléments trop détaillés et aux faces mal orientées, la solution que nous adoptons consiste à travailler sur des modèles débarrassés de leur ouvertures au chargement et d’accomplir la reconstruction avec la 3SR. En effet, la 3SR offre la possibilité de créer de nouveaux volumes dans les modèles pour combler les ouvertures quand elles n’y sont pas (cf. section 3.5). Elle s’avère être la méthode la plus adaptée pour la situation. Ainsi, comme illustrée par la figure 101, les ouvertures complexes sont simplifiées en de simples volumes parallélépipédiques (cf. figure 101c) qui permettent de garder le modèle fermé tout en simplifiant sa structure.

Nous choisissons donc les modèles IFC 2-Salles et Im-Bureau, desquels nous retirons les portes et les fenêtres au chargement. Nous obtenons alors les modèles 2-Salles-SO et Im-Bureau-SO illustrées par la figure 102 et dont les caractéristiques sont présentées dans le tableau 11. Le tableau 12 expose les résultats obtenus pour l’ensemble de la reconstruction topologique. La colonne 2 indique ainsi le nombre de brins qui n’ont pas été 2-cousus pendant les opérations de

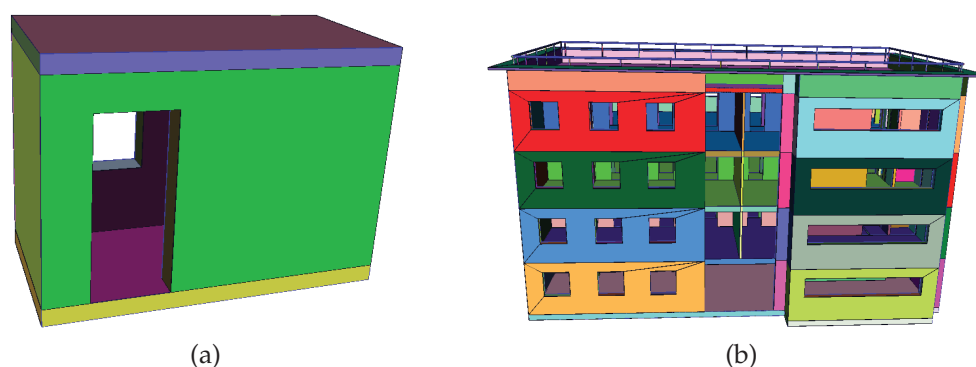


FIGURE 102 – Modèles IFC sans leurs ouvertures, à l’issue des prétraitements. (a) *2-Salles-SO*. (b) *Im-Bureau-SO*.

Modèles	Nb final de volumes	Nb de faces 2-libres	Nb de composantes connexes
<i>2-Salles-SO</i>	13	0 (0%) 41,8ms	1 ~ 0ms
<i>Im-Bureau-SO</i>	356	560 (1,74%) 0,007ms	43 29,3ms

TABLE 12 – Résultats des opérations de 2-couture (*colonne 2*) et de 3-couture (*colonne 3*) avec la méthode 3SR (les temps des opérations accompagnent chaque case).

2-couture, et la *colonne 3* donne le nombre de composantes connexes obtenu à l’issue des opérations de 3-couture. Nous constatons que cette fois-ci, la reconstruction s’est parfaitement déroulée pour *2-Salles-SO* avec 0% de brins 2-libres et 1 composante connexe unique obtenue. La figure 103a permet d’illustrer les composants reconstruits.

En ce qui concerne le modèle *Im-Bureau-SO*, nous constatons une amélioration du temps de reconstruction des liens β_2 principalement (70,97s) mais aussi une meilleure reconstruction des liens β_3 malgré les 43 composantes connexes affichés. Ces volumes isolés dans l’EBM-LCC peuvent s’expliquer par les supports des rampes d’escaliers et du toit, qui ont été représentés comme des objets flottants (cf. figure 100). Mais comme nous pouvons le constater sur la figure 103b, la 3SR est parvenue d’une part à reconstruire les volumes remplaçant les portes et fenêtres ignorées au chargement du modèle de départ et d’autre part elle parvient à bien reconstruire les divers composants du bâtiment.

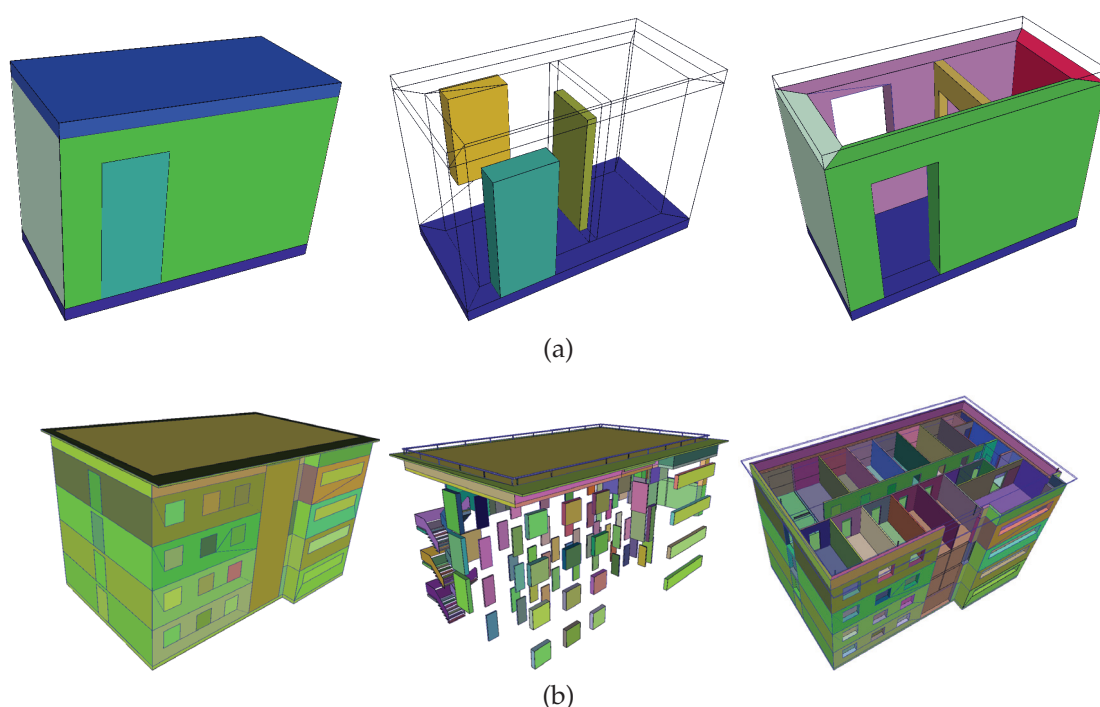


FIGURE 103 – Résultats de la reconstruction par la méthode 3SR. Gauche : vue d'ensemble de l'EBM-LCC obtenu ; milieu : nouveaux volumes simplifiés des ouvertures ; droite : aperçu sur une sélection de composants reconstruits (les autres sont cachés manuellement) . (a) 2-Salles-SO. (b) Im-Bureau-SO.

5.2.4 Problèmes sur les données SIG

Les principaux problèmes topologiques autour des données SIG de type LoD2 sont liés au terrain. En effet, le sol n'étant pas forcément plat, sa représentation avec des faces polygonales planes expose ces dernières à des écarts résultants sur des brèches à la surface du sol représenté. Cela peut bien entendu être évité avec un raffinement des surfaces aux parties courbes, mais le niveau de détails des modèles ne nécessite pas autant de précision en général. Comme illustré par la figure 104a, la méthode de reconstruction classique qui se contente de lier par β_2 les faces autour d'une même arête ne rencontre pas de problèmes à reconstruire la topologie d'une pareille surface, à condition de définir convenablement les valeurs ϵ . À l'opposé, ces courbures constituent le principal problème de la méthode 3SR du fait de la projection des faces sur des plans avant l'application des arrangements. En effet, cette projection a pour conséquence l'accentuation des gaps entre les faces au sol et le morcélement de ce sol en plusieurs surfaces planes (cf. figure 104b et 104d).

Par ailleurs, le contact entre les bâtiments et le sol constitue un autre problème dans les données SIG. Puisque les murs des constructions sont obtenues par extrusion jusqu'au sol des arêtes des toits préalablement reconstruits (par analyse

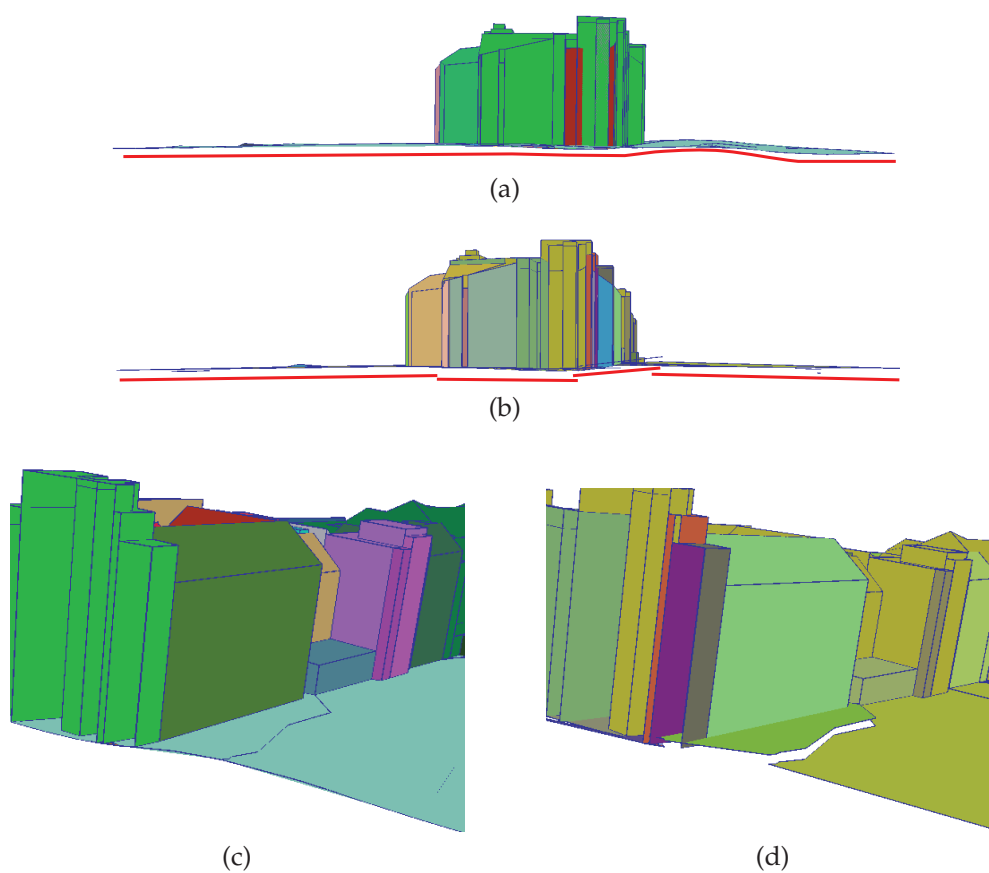


FIGURE 104 – Reconstruction topologique de la surface du sol sur le modèle *District*. (a) Méthode classique : le sol est reconstruit malgré ses courbures. (b) 3SR : le sol est morcelé en plusieurs surfaces planes. (c) Zoom sur une zone critique bien liée par la méthode classique et (d) morcellée par la 3SR.

de données scanner LiDAR par exemple), cette extrusion se fait jusqu'à dépasser la surface du sol pour s'assurer du contact entre les entités (cf. figure 105a). Par conséquent, d'une part les bâtiments ne constituent pas des volumes fermés, d'autre part ce dépassement rend impossible la liaison topologique de ces bâtiments à la 3-cellule correspondant au sol avec nos méthodes de reconstruction. C'est ce qui explique une bonne partie des nombreux brins 2-libres à l'issue des processus (cf. tableau 9). Une autre partie de ces brins 2-libres s'explique par les volumes aux frontières des modèles comme illustré par la figure 105c. En effet, les données SIG d'une grande ville sont souvent découpées par dalles de dimensions constantes (en m^2). Cette découpe peut intervenir à des niveaux du modèle où se situent des bâtiments, qui seront par conséquent également découpés. Cela a pour effet de créer d'autres bords sur les volumes au niveau des coupes.

Alors que ces bâtiments en bout de dalle peuvent simplement être ignorés ou retirés, une solution aux problèmes de dépassement des murs au sol serait l'application d'opérations booléennes entre les différentes surfaces pour couper

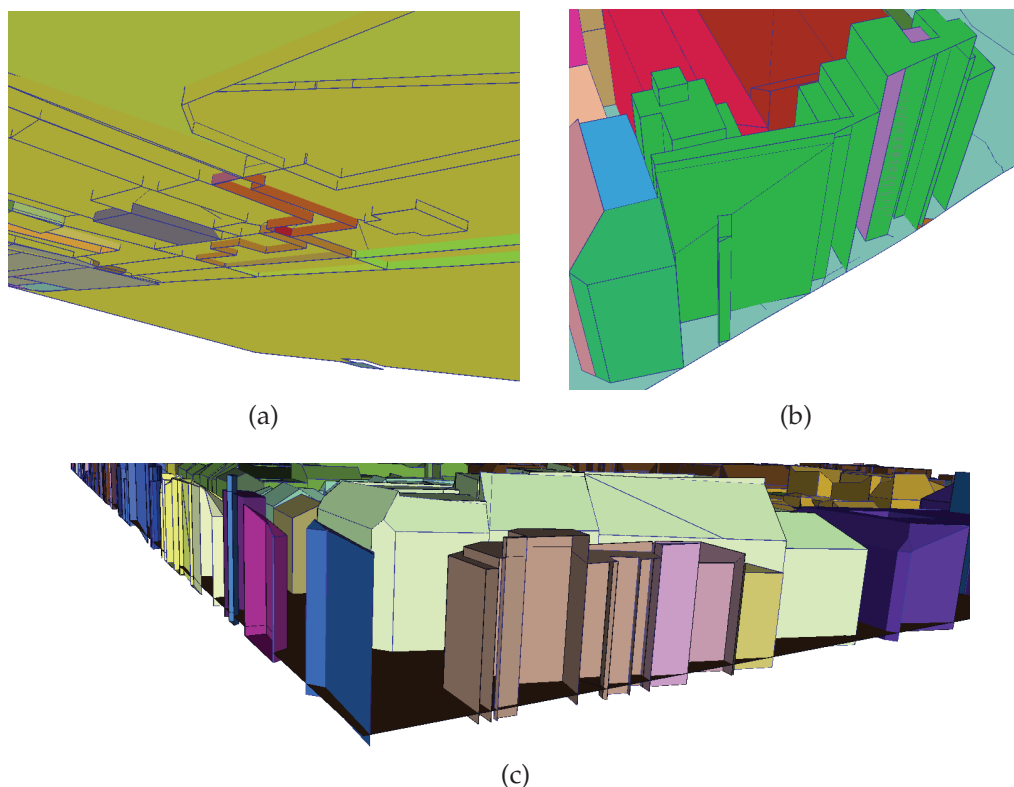


FIGURE 105 – Problèmes sur les représentations des modèles SIG. (a) Dépassement des murs en dessous du sol. (b) Bâtiments coupés aux frontières des dalles. (c) Vue d’ensemble des deux problèmes à un angle de la dalle *Paris-LoD2*.

les parties excédentes et constituer ainsi des contacts précis entre le sol et les bâtiments. Cela reviendrait à faire de la correction des données SIG, ce qui n’est pas dans le cadre de la thèse et constitue un sujet de recherche à part entier. Nous pouvons cependant faire usage de la méthode de reconstruction classique qui parvient à bien reconstruire le sol ainsi que les bâtiments dans les données, permettant de pouvoir procéder entre autres à l’étiquetage sémantique sur les modèles SIG.

5.2.5 Impact du Choix des Marges d’Erreur ϵ

Le choix des bonnes marges d’erreur à utiliser dans les calculs est déterminant pour la réussite des opérations de reconstruction topologique. Mais du fait des nombreux critères qui rentrent en jeu dans la détermination de ces marges, les choisir de manière totalement automatique reste très difficilement envisageable. Les valeurs dont nous avons fait usage lors des tests précédents, à savoir : $\epsilon_{eg} = 10^{-3}$, $\epsilon_{cop} = 10^{-3}$ et $\epsilon_{ang} = 5$ se sont avérées être les valeurs offrant les meilleurs résultats à travers nos différentes expérimentations. Nous proposons ici d’étudier le comportement du modèle *S-House* (cf. figure 95) sur différentes

valeurs de ϵ_{eg} et ϵ_{cop} . Il est moins difficile de déterminer une valeur pour ϵ_{ang} car les valeurs angulaires restent constantes indépendamment de l'échelle des objets représentés, raison pour laquelle nous maintenons $\epsilon_{ang} = 5$.

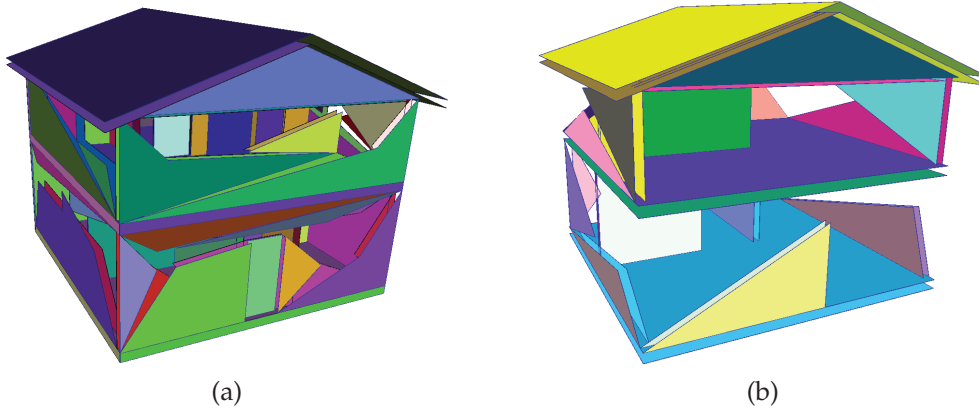


FIGURE 106 – Impact des valeurs des marges ϵ sur les modèles. (a) $\epsilon_{eg} = 1, \epsilon_{cop} = 1$.
(a) $\epsilon_{eg} = 2, \epsilon_{cop} = 2$.

Le tableau 13, présente les résultats des opérations de reconstruction (méthode classique) effectuées avec des valeurs d' ϵ allant de 0 à 2. Dans le tableau du haut, ϵ_{eg} et ϵ_{cop} ont les mêmes valeurs. La reconstruction avec 10^{-6} se rapproche le plus du meilleur résultat. Elle contient néanmoins 8 brins 2-libres ainsi que 2-composantes connexes, ce qui est signe de 2-coutures et 3-coutures manquées. Lorsque les deux ϵ sont nuls, les prétraitements et la reconstruction des liens β_2 semblent bien se dérouler mais une erreur d'insertion de points durant la phase de découpe qui précède les 3-coutures empêche le processus d'arriver à terme. Pour les valeurs > 1 , nous observons une dégradation des modèles dès la phase de prétraitement, comme illustré par la figure 106. Par conséquent les reconstructions qui suivent échouent irrévocablement.

Dans le tableau du milieu, $\epsilon_{eg} = 10^{-3}$ ne change pas et ϵ_{cop} prend les valeurs de 0 à 2 toujours. Les reconstructions alors produites s'avèrent plutôt pertinentes, et très proche du résultat de référence. En effet, bien qu'il y ait à chaque fois des brins 2-libres à l'issue des 2-coutures, toutes les valeurs résultent sur une unique composante connexe après les 3-coutures, excepté pour $\epsilon_{cop} = 2$ (8 composantes connexes). Par ailleurs à aucun moment le modèle n'est altéré. Enfin dans le tableau du bas, nous procédons cette fois ci à la fixation de ϵ_{cop} à 10^{-3} , puis nous changeons ϵ_{eg} . Les résultats obtenus sont identiques à ceux du tableau du haut, à l'exception de la colonne 2, dans laquelle une composante connexe unique a été finalement obtenue (au lieu de 2 pour le tableau du haut). Cela permet de dire que pour ce modèle *S-House*, ϵ_{eg} constitue la marge d'erreur la plus influente.

ϵ_{eg}	0	10^{-6}	10^{-3}	1	2
ϵ_{cop}	0	10^{-6}	10^{-3}	1	2
Total de brins	1528	1516	1516	404	121
brins 2-libres	0	8	0	360	117
Nb de volume	✗	40	40	84	33
Nb de CC	✗	2	1	84	33
<hr/>					
ϵ_{eg}	10^{-3}	10^{-3}	10^{-3}	10^{-3}	10^{-3}
ϵ_{cop}	0	10^{-6}	10^{-3}	1	2
Total de brins	1516	1516	1516	1516	1516
brins 2-libres	12	12	0	12	12
Nb de volumes	40	40	40	40	40
Nb de CC	1	1	1	1	8
<hr/>					
ϵ_{eg}	0	10^{-6}	10^{-3}	1	2
ϵ_{cop}	10^{-3}	10^{-3}	10^{-3}	10^{-3}	10^{-3}
Total de brins	1528	1516	1516	404	121
brins 2-libres	0	8	0	360	117
Nb de volume	✗	40	40	84	33
Nb de CC	✗	1	1	84	33

TABLE 13 – Résultats de la reconstruction topologique sur le modèle *S-House* en changeant les valeurs des marges d'erreur ϵ_{eg} et ϵ_{cop} . La colonne 3 correspond aux valeurs avec lesquelles la reconstruction est parfaite et sert de référence. CC = Composantes Connexes.

5.3 ÉTIQUETAGE SÉMANTIQUE

Comme spécifié dans la section 4.1.2, le processus de propagation des étiquettes sémantiques par le biais des règles heuristiques nécessite un point de départ pour les modèles BIM. Les pièces du bâtiment constituant ce point de départ, leur reconstruction et identification est donc cruciale pour lancer l'étiquetage automatique. Par conséquent un modèle dans lequel les pièces sont mal reconstruites ne pourra pas bénéficier d'une sémantique correcte avec les règles que nous avons définies (cf. chapitre 4). Le tableau 14 expose les résultats de l'étiquetage sémantique sur trois modèles BIM.

Les figures 107 et 108 illustrent les pièces reconstruites dans les modèles du tableau 14, à l'issue de la 3SR. En effet, nos règles heuristiques supposent que les portes et les fenêtres sont des volumes parallélépipédiques simples. De ce

Modèles	Nb de Pièces	Murs / Façade	Nb de Planchers	Nb de Portes	Nb de Fenêtres	Temps (ms)
<i>2-Salles</i>	2	5/4	1	2	1	4,4
<i>S-House</i>	8	16/8	3	7	12	22,3
<i>Office</i>	57	95/20	5	61	79	429,3

TABLE 14 – Résultats de l'étiquetage sémantique avec les nombres de composants identifiés.

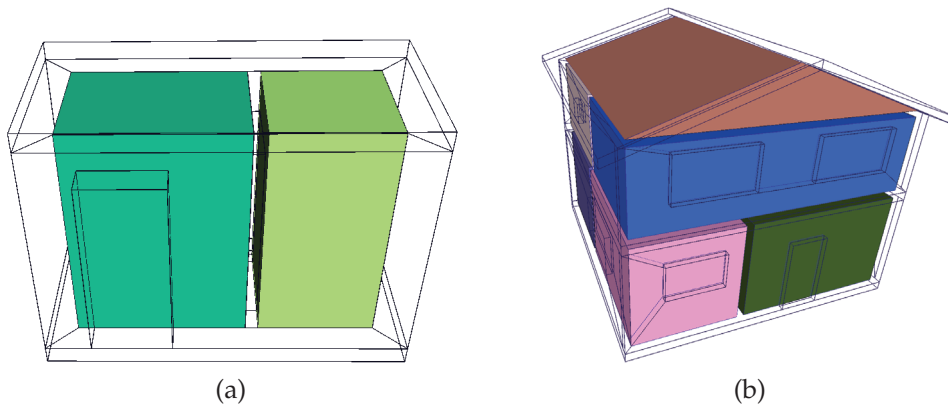


FIGURE 107 – Volumes des pièces reconstruites sur des modèles BIM. (a) *2-Salles*. (b) *S-House*.

fait, les ouvertures complexes dans les modèles ne peuvent pas être correctement identifiés, raison pour laquelle dans cette section les ouvertures du modèle *2-Salles* ont été retirées (cf. figure 101). Par conséquent la méthode classique n'est pas adaptée, car elle n'est pas en mesure de compenser l'absence des ouvertures ni de reconstruire les volumes de pièces dans des modèles ouverts (porte ouverte ou sans ouverture). Cependant elle produit le même résultat que la 3SR sur les modèles *S-House* et *Office*.

La figure 109 montre le résultat de l'étiquetage sémantique sur le modèle *Office*. Tous les éléments ont été identifiés, ce qui en fait un EBM-LCC complet. Nous pouvons constater dans le tableau 14 que le processus de la propagation sémantique s'effectue très rapidement (0,43s sur *Office*). C'est parce que les diverses opérations qu'elle nécessite sont principalement des opérations géométriques et de la navigation à travers les différentes cellules du modèle pour utiliser leur informations sémantiques.

Un exemple de modèle sur lequel l'étiquetage sémantique échoue est donné par *Im-Bureau*. Malgré la reconstruction avec succès des ouvertures (cf. figure 102b), il reste toujours le problème des intersections volumiques qui semblent

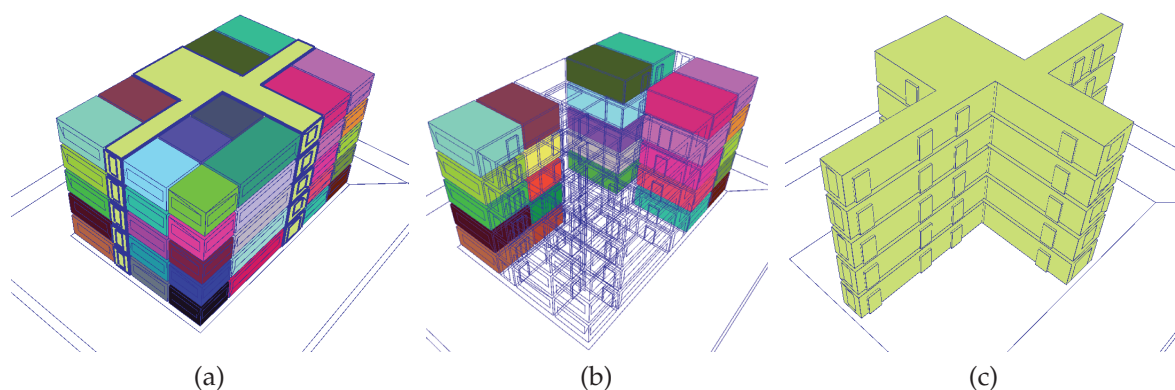


FIGURE 108 – Volumes des pièces du modèle *Office*. (a) Toutes les pièces. (b) Les pièces de devant sont cachées pour rendre visibles celles à l’arrière. (c) Volume correspondant au réseau des couloirs du bâtiment, également identifiée comme étant une pièce.

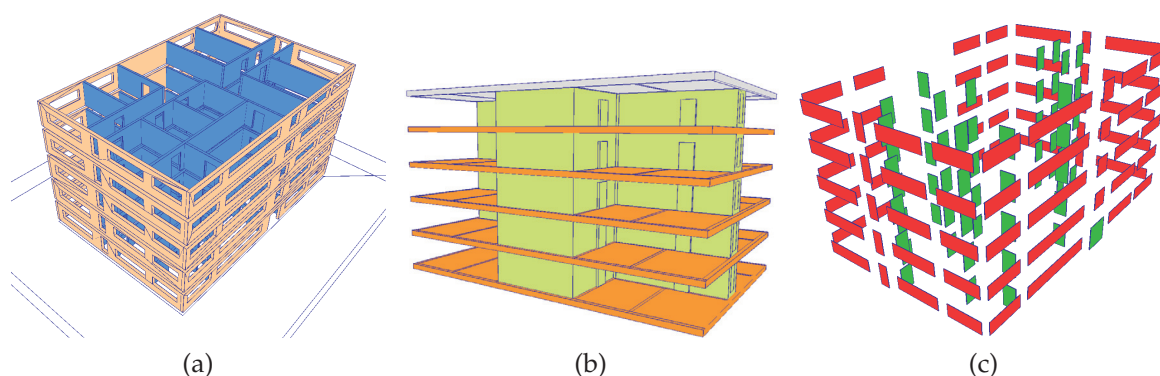


FIGURE 109 – Étiquetage sémantiques des composants de *Office*. (a) Murs de la façade (beiges) et murs internes (bleus). (b) Planchers (oranges) et toit (gris). En vert il s’agit du volume correspondant au réseau de couloir. (c) Portes (vertes) et fenêtres (rouges) du modèle.

être situées entre les différents planchers des étages du modèle (cf. figure 100e). Cela a pour conséquence directe de brouiller les frontières des pièces. Il en résulte de ce fait un bloc unique correspondant à la fusion de toutes les pièces de ces étages, comme l’illustre la figure 110c. En effet, seules les pièces au dernier étage bénéficient d’une bonne reconstruction. Cela s’explique par le fait que les escaliers qui contiennent des éléments flottants et qui sont les principaux vecteurs de propagation des intersections volumiques entre les étages s’arrêtent justement au dernier étage (cf. figure 110d). Par ailleurs, puisque la 3SR peut boucher les trous dans le modèle, elle permet d’isoler ainsi les pièces du haut. La définition des volumes pièce n’étant donc pas bonne, l’étiquetage sémantique donne des résultats erronés. Et même si certains volumes du modèle sont convenablement étiquetés, la processus de propagation combinant les bonnes et

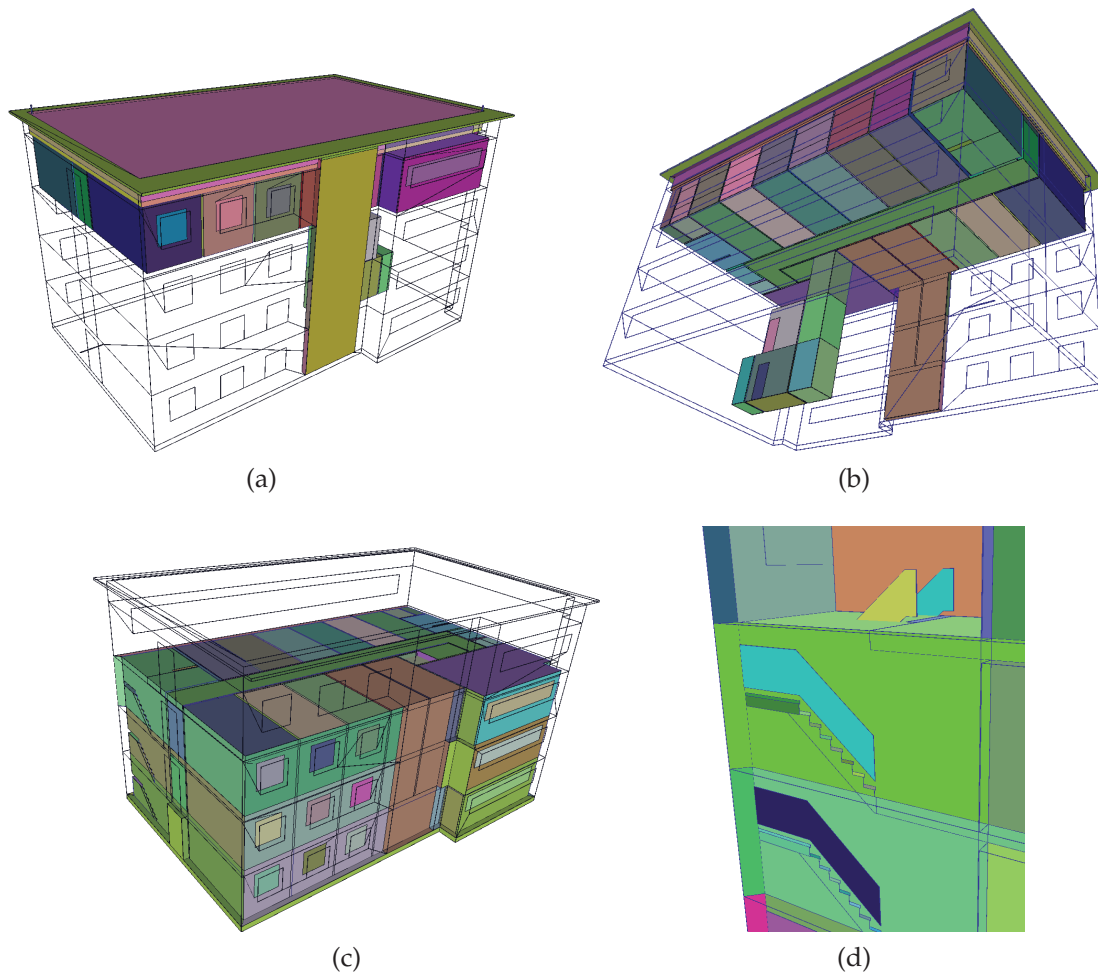


FIGURE 110 – Mauvaises reconstructions des pièces dans le modèle *Im-Bureau*. (a) et (b) Volumes des seules pièces bien reconstruites au niveau du dernier étage et quelques-une en dessous. (c) Toutes les autres pièces sont fusionnées. (d) Escaliers aux niveaux desquels les intersections volumiques déteignent sur les étages supérieurs, sauf au dernier étage.

les mauvaises informations ne permettra pas d'arranger le résultat final. La figure 111 expose les résultats pour certaines étiquettes sémantiques qui ont été affectées aux volumes.

Nous constatons notamment que les murs intérieurs du dernier étage ont été bien identifiés, de même que le plancher juste au dessus (cf. figures 111a et 111b). Mais il y a tout de même à ce niveau des volumes mal interprétés. C'est le cas des ouvertures par exemple. Nous constatons sur la figure 111c beaucoup de murs qui ont été identifiés comme des fenêtres. Quant aux portes, du fait de l'absence de l'indentification des planchers sur lesquels se base la règle heuristique pour les portes, elles ne sont par conséquent pas identifiées et se retrouvent dans les volumes sans étiquettes (cf. figure 111d). Il en est de même pour d'autres élé-

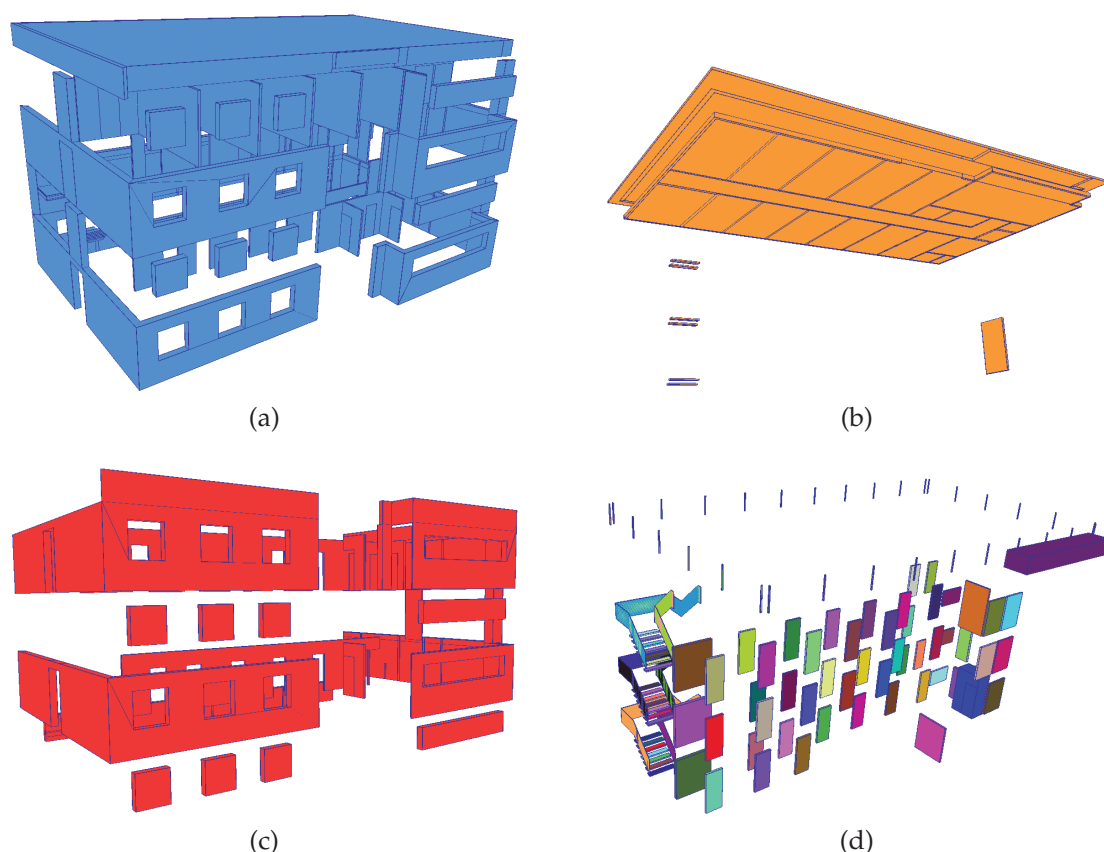


FIGURE 111 – Mauvais étiquetage sémantique du modèle *Im-Bureau*. (a) Murs. (b) Planchers. (c) Fenêtres. (d) Volumes non identifiés.

ments, comme les escaliers pour lesquels nous n'avons définie aucune règle.

Pour les données SIG, l'information géométrique est suffisante pour démarrer la propagation sémantique. Le tableau 15 donne les résultats de l'étiquetage sémantique sur les modèles *District* et *Paris-LoD2*, (cf. figure 112a et 112b). Les nombres de faces étiquetées murs et toit sont comparés à ceux des fichiers CityGML dont sont issues les données. Cependant, dans ces dernières les faces sont triangulées, ce qui explique l'importante réduction du nombre de faces qui reste un avantage pour des applications d'analyse tout comme de visualisation. Pour les raisons explicitées dans la sous section 5.2.4, la méthode de reconstruction classique a été utilisée pour traiter les deux modèles. Ainsi, pour un grand modèle comme *Paris-LoD2*, le processus de sémantisation se déroule en 1,23s, s'alignant ainsi sur un ordre de temps légèrement supérieur à l'étiquetage sémantique des BIM.

Nous avons aussi testé des modèles de LoD3 sans changer nos règles heuristiques, et il s'avère que ce type de données se prête plutôt bien aux règles de processus, comme le montre la figure 112d. Bien entendu, la principale dif-

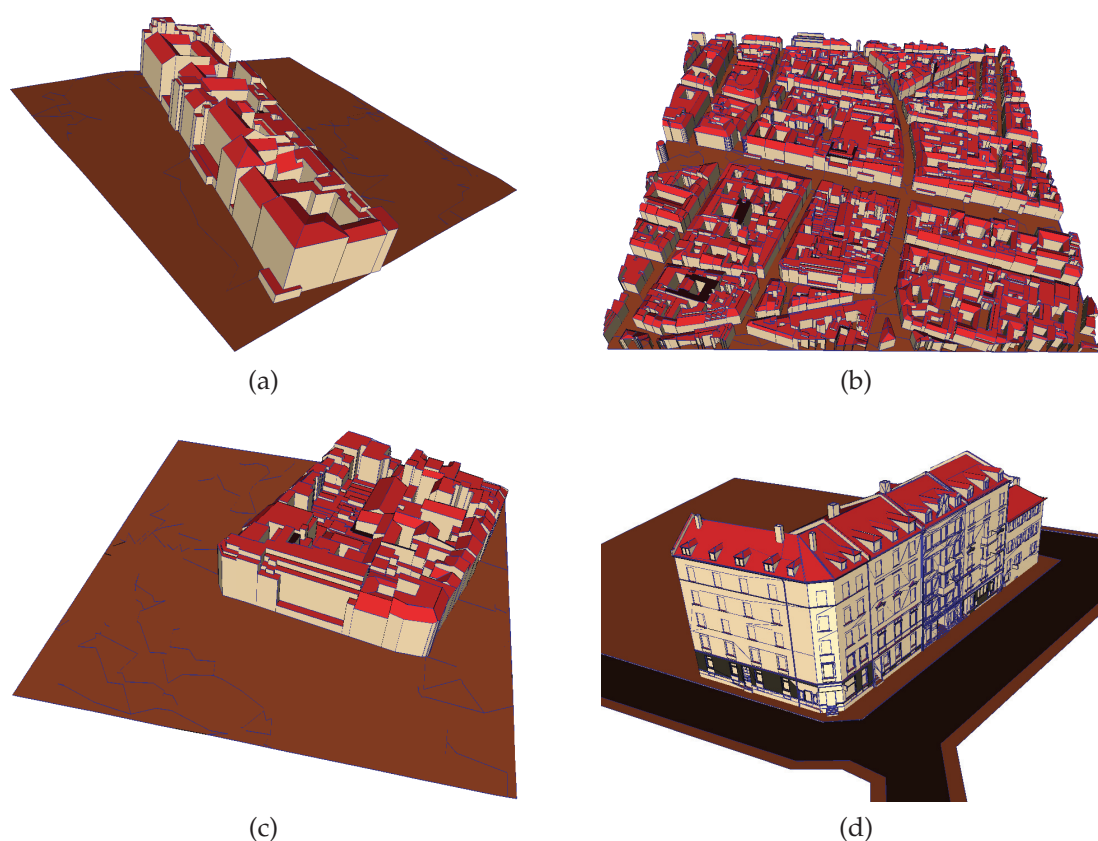


FIGURE 112 – Étiquetage sémantique sur des modèles SIG. (a) *District*. (b) *Paris-LoD2*. (c) Autre modèle SIG de LoD2. (d) Test sur un modèle de LoD3.

férence entre le LoD2 et le LoD3 reste les détails sur la façade. Vu que nous n'avons aucune règle prévue pour les fenêtres, elles sont étiquetées comme des murs. Mais cela permet d'être enthousiaste sur la facilité d'une extension de la méthode actuelle à des modèles plus détaillés. Par ailleurs nous parvenons à obtenir une bonne sémantisation du sol, ce qui peut par ailleurs aider à compenser les défauts topologiques qui y sont liés. Les informations géométriques se révélant être très utiles sur des modèles de ce niveau de détail, il serait intéressant d'envisager de mettre au point une méthode hybride utilisant la géométrie pour corriger la topologie, et vice-versa.

5.4 EXTRACTION D'INFORMATION POUR DE LA SIMULATION ACOUSTIQUE

La simulation acoustique constitue l'un des analyse phares durant la construction d'un bâtiment. Elle s'attaque à des problèmes de très haute importance tant sur le plan du confort des individus (insonorisation, isolation, etc) que sur le plan structurel du bâtiment (pour des constructions à proximité des aéroports par exemple). Nous abordons dans cette section l'extraction d'informations dédiées à la simulation acoustique depuis un modèle EBM-LCC.

Modèles	Nb de murs avant/après	Nb de toits avant/après	Recons. du sol	Temps (ms)
<i>District</i>	1062/483	419/99	✓	13,83
<i>Paris-LoD2</i>	24414/10023	9979/3379	✓	$1,23 \times 10^3$

TABLE 15 – Résultats de la sémantisation automatique sur des modèles SIG.

5.4.1 Modèle des Plaques Minces (MPM) pour l'Acoustique

Une méthode de calcul couramment utilisée dans la simulation acoustique est basée sur le Modèle des Plaques Minces (MPM). Cela exige des informations sur trois types de structure du bâtiment que sont les pièces, les parois et les jonctions. Le principe du MPM est de simplifier les parois du bâtiment en tant que plaques plates qui bordent les chambres. Une paroi est alors représentée par deux faces confondues qui peuvent avoir des propriétés différentes, en fonction du côté de la paroi auquel elle appartiennent. Les jonctions correspondant à la zone où les parois et/ou les planchers se croisent, sont par conséquent représentés par des arêtes. Les pièces quant à elles restent des volumes et correspondent aux enveloppes fermées délimitant les volumes d'air à l'intérieur d'un bâtiment (cf. figure 113b). Nous ne visons pas à transformer l'EBM-LCC en MPM, mais plutôt à extraire les informations nécessaires à la place. À cet effet, la géométrie, la topologie ainsi que les informations sémantiques sont nécessaires pour chacun des composants du modèle de la construction impliquée dans le MPM.

5.4.2 Informations Requises pour AcouBAT

Le logiciel utilisé pour procéder aux calculs acoustiques est AcouBAT, développé par le CSTB [41]. AcouBAT propose un modeleur de bâtiments simplifiés dans son interface, mais n'est pas encore en mesure de prendre un fichier externe en entrée. Ainsi, nous visons à créer un fichier d'échange permettant d'évaluer les performances acoustiques d'un modèle de bâtiment avec le logiciel. Nous produisons un fichier XML de l'EBM-LCC pour stocker les informations appropriées dans un style pratique pour AcouBAT. Le tableau 16 résume les renseignements exigés par AcouBAT pour chaque structure pièce, paroi et jonction.

Le formalisme d'un fichier XML convient bien aux besoins de ce problème parce que les liens topologiques entre les entités peuvent être exprimés au moyen de références (REF) qui sont des pointeurs vers des identifiants spécifiques. Ainsi, un identifiant unique doit être définie pour chaque composant. Nous définissons un ensemble de 5 types pour décrire les étiquettes spécifiques adaptées aux faces du modèle étudié : room-wall (RW), room-opening (RO), room-junction (RJ), wall-opening (WO), wall-junction (WJ) (cf. figure 113a). Notons

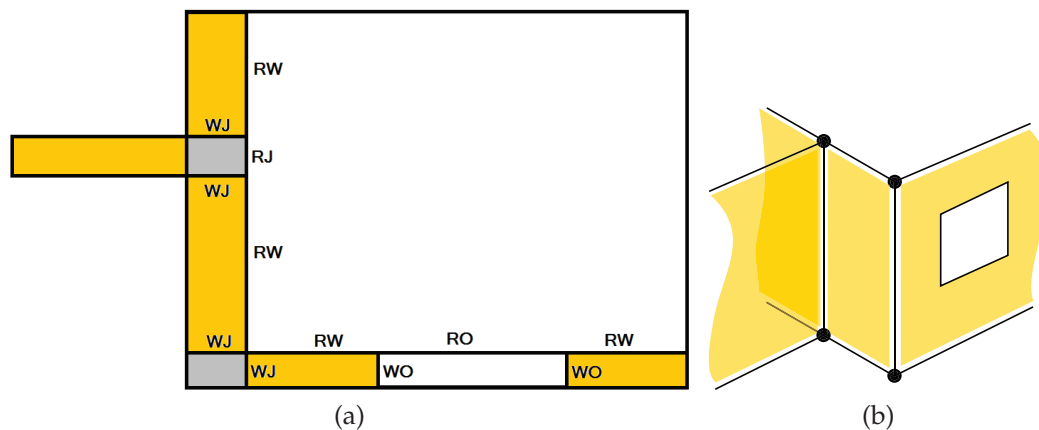


FIGURE 113 – (a) Coupe 2D des composants du bâtiment représentant une pièce (grande face blanche), les murs (jaunes), des ouvertures (petit faces blanches) et les jonctions (grises). Les types sont définis pour les faces des pièces et des bordures murales. (b) Représentation en plaques minces équivalente.

qu'avec le MPM, la définition des parois comprend également les planchers et les toits plats. Les toits inclinés ne sont pas encore pris en compte dans AcouBAT, par conséquent nous les ignorons ici. La plupart des informations nécessaires sont déjà présents dans l'EBM-LCC, mais quelques-unes ont besoin d'être explicitement définies en raison des différences entre l'EBM-LCC et le MPM.

Outre les identifiants et les types, AcouBAT exige de chaque pièce : son volume, la liste des faces qui la délimitent et leurs aires. Pour les parois, leurs épaisseurs sont nécessaires, en plus des faces qui délimitent les murs auxquels ces parois correspondent, de même que leurs aires. Cela inclut l'ensemble des faces autour d'une cloison de mur (voir la section 5.4.3). Elles jouent un rôle clé dans la description d'une paroi car elles fournissent des informations sur son environnement par le biais des types qui leur sont affectés. Pour les jonctions qui sont à l'intersection entre deux ou plusieurs parois, leurs longueurs sont nécessaires car elles correspondent à des arêtes dans le MPM. Une description des parois autour des jonctions et de leur configuration angulaire est également nécessaire. Le rôle des jonctions dans les calculs acoustiques est d'une importance capitale car une partie considérable de la transmission des bruit dans un bâtiment se produit à leurs niveaux.

5.4.3 De l'EBM-LCC au MPM

Notre objectif ici est d'extraire les informations spécifiques requises par AcouBAT, selon le MPM pour être en mesure d'effectuer la simulation acoustique. A partir de notre structure unifiée, nous parcourons toutes les composantes de l'EBM-LCC et fournissons les informations nécessaires concernant les pièces, les

Information requises par AcouBAT	
Pièces	ID Volume ID et type des faces qui l'enveloppent Aires de ces faces
Parois	ID et type Épaisseur ID des faces qui l'enveloppent Types et aires des faces aux bordures Ouvertures
Jonctions	ID Longueur ID des parois autour Angle entre les parois

TABLE 16 – Liste des informations requises par AcouBAT pour procéder aux opérations de simulation. Ils sont fournis dans un fichier XML.

parois et les jonctions. Dans les sections suivantes, nous décrivons l'extraction d'informations pour chacun de ces composants.

Description des pièces

La description requise par le MPM pour les pièces correspond déjà à celui offert par l'EBM-LCC. Après le processus d'étiquetage sémantique, toutes les 3-cellules correspondantes aux pièces sont identifiées et un identifiant (ID) unique est attribué à chacune d'elles. La valeur du volume de ces pièces est calculée en faisant usage de la méthode définie dans la section 4.1.2. Ensuite, pour chaque 3-cellule pièce, nous parcourons toutes ses faces grâce aux liens β_1 et β_2 qui les lient et nous procurons à chacune d'elles un ID unique également. Enfin, pour toute face F_A contenant le brin b_A et appartenant au volume pièce V_A , si $\beta_3(b_A) = b_B$, avec $b_B \in F_B$ une face d'un autre volume V_B du même modèle, le type de F_A est déterminé en confrontant les attributs sémantiques de V_A et V_B . Par exemple, sachant que V_A est une pièce (R), si V_B est un mur (W), le type de F_A sera alors RW.

Description des Murs

La description des murs comme des plaques minces est implicitement présente dans l'EBM-LCC. Comme le montre la figure 114, en croisant sur un même

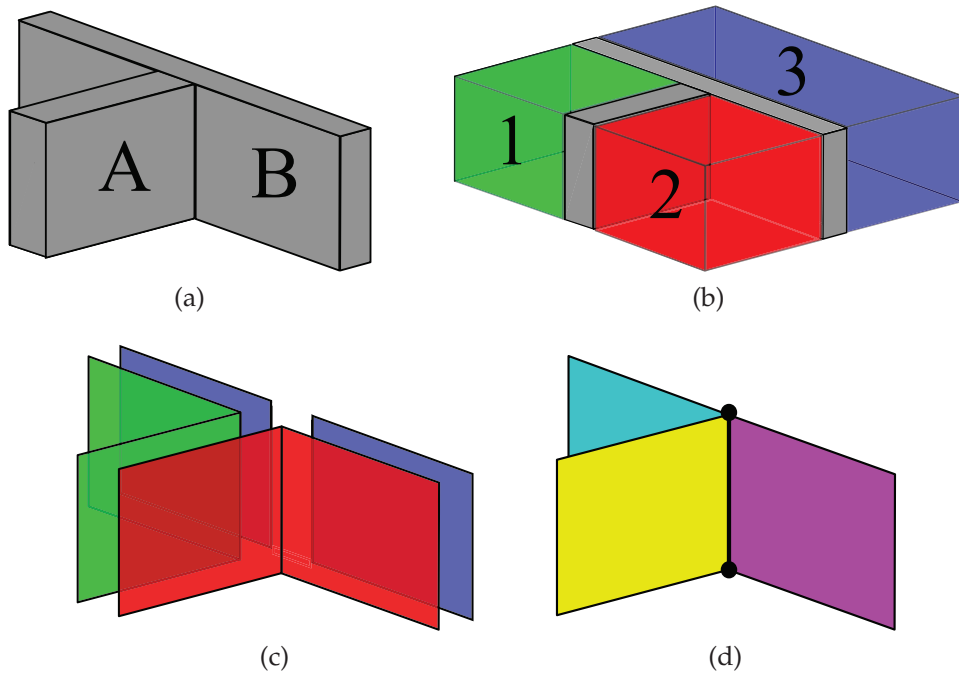


FIGURE 114 – (a) Intersection entre deux murs A et B. (b) Les murs sont entourés par trois pièces verte (1), rouge (2) et bleu (3). (c) Partitions de A et B qui sont en contact avec les pièces. (d) Parois murales résultantes et qui sont la combinaison des parties parallèles des murs.

plan les 2-cellules à travers lesquelles un mur donné est 3-cousu à des pièces, le mur peut alors être décomposé en plusieurs partitions de paroi. Ces dernières seront caractérisées par leurs deux côtés liés à différents volumes de pièce ou éventuellement à l'extérieur. Ainsi le mur B a été décomposé en deux parties, l'une entourée des pièces 1 et 3 et l'autre par 2 et 3 (cf. figure 114c). Les paires de côtés de paroi assemblées conduisent à la définition des plaques minces (cf. figure 114d). Un identifiant unique est attribué à chaque partition de la paroi et le type est simplement donné sur la base de sa position dans le modèle (intérieur ou extérieur).

En effet, les faces utilisées ici pour former les parois sont les mêmes que celles de type RW décrivant les volumes des pièces. Comme ils sont déjà définis dans le XML à ce niveau du processus, leurs identifiants sont simplement indexés à l'aide des ID. Ensuite, l'épaisseur de la paroi est évaluée en utilisant la méthode décrite dans la section 4.1.2. Nous supposons une épaisseur constante sur les volumes mur, de ce fait la valeur est déterminée une fois puis utilisée pour toutes les partitions d'un même mur.

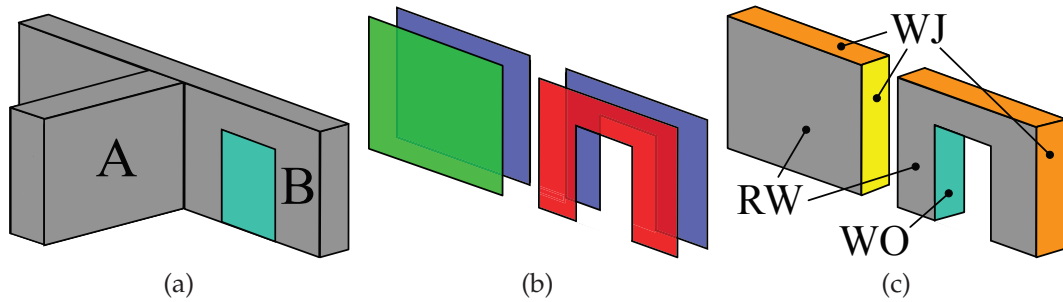


FIGURE 115 – (a) Murs A et B de la figure 114, avec B contenant une porte. (b) Partitionnement murale de B résultante. (c) Faces aux bordures entourant les partitions RW (gris) ; les faces de type WJ sont soit créées (jaunes) ou déduite des faces existantes (orange).

En ce qui concerne les faces aux bordures des murs, exceptées celles de type WJ se trouvant au niveau des jonctions mur/mur, toutes les autres ont des équivalences directes dans l'EBM-LCC (voir la figure 115c). Mais elles ne sont pas toujours explicitement décrites et nécessitent souvent des fusions/découps des faces du volume mur qui les contient. Leurs types sont alors définis en fonction de la partie du mur d'origine à laquelle elles correspondent et leurs aires peuvent être calculées. Par exemple, si le mur en question est 3-cousu à un volume porte par des face aux bordures alors elle seront considérées comme des faces de type WO. Sinon, leur type sera WJ si leur mur est 3-cousu à un autre mur ou un plancher de l'EBM-LCC à travers elles.

Enfin, les ouvertures au niveau d'une paroi donnée sont facilement détectables grâce aux liens β_3 qui les lient à la paroi en question, puis leurs étiquettes sémantiques sont utilisées pour différencier leur nature (porte ou fenêtre). En parcourant toutes les faces d'une 3-cellule étiquetée comme une ouverture, l'ensemble de ses 2-cellules liées à la paroi permet de décrire les faces de bordure de type WO. En ce qui concerne les 2-cellules topologiquement liées à des volumes pièces (ou l'extérieur), elles sont déjà identifiées comme étant de type RO lors de la description des pièces dans la section précédente.

Description des jonctions

Les jonctions sont décrite de manière totalement implicite dans le EBM-LCC. Nous les décrivons donc en détectant les intersections mur/mur ou sol/mur. Nous effectuons cela simplement en parcourant les volumes de mur et de sol jusqu'à trouver les faces à travers lesquelles elles sont 3-cousues à d'autres murs. Nous avons établi une configuration spécifique au niveau des intersections afin de mieux organiser la collecte des informations. Ainsi à chaque jonction, une paroi est défini comme étant le récepteur, une autre comme étant visiteur et po-

tentiellement une paroi de croisement (cf. figure 116a).

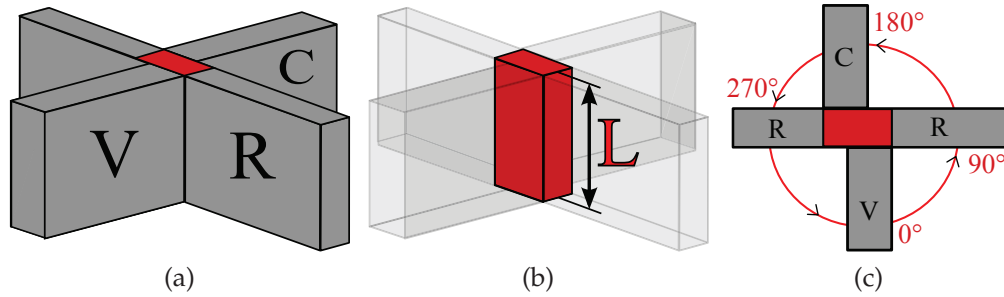


FIGURE 116 – (a) Trois murs se croisent formant une jonction : le récepteur R, le visiteur V et un mur de croisement C ; les murs ne sont pas nécessairement alignés au niveau des jonctions. (b) Évaluation de la longueur L de la jonction. (c) Angle autour de la jonction, en utilisant le mur visiteur V comme référence (angle 0°).

Un mur sera considéré comme *récepteur* au niveau d'une jonction si la normale de sa face à la zone de contact est dans le sens de son épaisseur. Dans le cas contraire, il est considéré comme étant un *visiteur*, et toute autre paroi identifiée comme étant un visiteur en dehors de la première est classée dans la catégorie des parois de *croisement*. Dans nos travaux, nous supposons qu'il ne peut y avoir qu'une seule paroi de *croisement* au niveau d'une jonction. Elle peut ne pas être alignée avec la paroi *visiteur* au niveau de la jonction. Dans pareil cas, le décalage qui existe entre les deux murs est considéré dans la définition de la jonction, comme l'illustre le volume rouge dans la figure 116. La longueur est par conséquent calculée sur cette base également. Une fois que toutes les parois concernées sont identifiées autour d'une jonction, des ID uniques leur sont attribués et les ID aux partitions murales précédemment définies sont utilisés pour les indexer. La hiérarchie est ensuite utilisée pour définir l'angle entre les murs, en considérant le *visiteur* comme étant la référence 0° (cf. figure 116c). Le tableau 17 donne quelques statistiques sur les informations extraites à partir des modèles *2-Salles-SO*, *S-House* et *Office*. Une illustration des jonctions extraites de *S-House* est donnée par la figure 117. Nous pouvons notamment y distinguer les faces de type WO, qui constituent des faces aux bordures des murs au niveau de leurs ouvertures.

5.5 EXTRACTION D'INFORMATION POUR DU LANCER DE RAYONS

L'efficacité d'une opération de lancer de rayons réside dans la capacité de trouver rapidement l'intersection la plus proche entre un rayon donné et la géométrie de la scène. Une approche naïve consisterait à tester tous les polygones qui com-

Modèles	# Pièces	# Parois	# Jonctions	Temps (s)
<i>S-House</i>	7	44	71	0,25
<i>2-Salles-SO</i>	2	9	17	0,05
<i>Office</i>	56	245	612	1,61

TABLE 17 – Extraction d’informations acoustiques sur les modèles *2-Salles-SO*, *S-House* et *Office*. Les diverses colonnes correspondent aux nombres de pièces, de parois et de jonctions extraites ainsi que les temps d’extraction incluant la génération du fichier XML (en secondes).

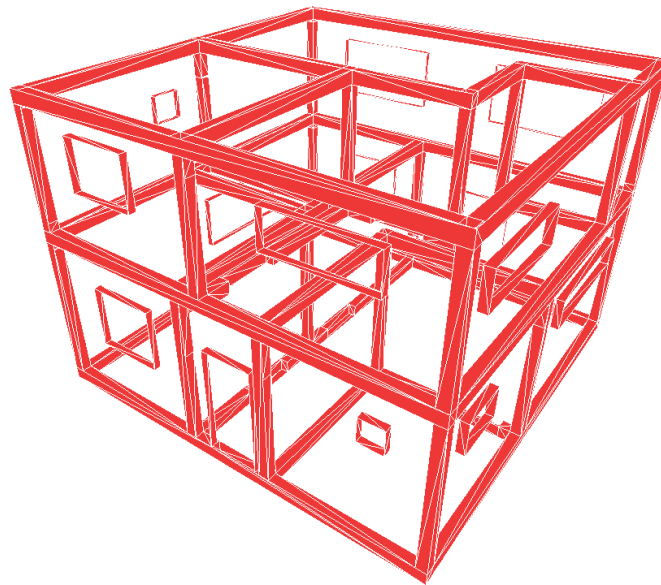


FIGURE 117 – Ensemble des jonctions et faces de type WO extraites du modèle *S-House*.

posent la scène afin de trouver ceux qui s’intersectent avec un rayon donné et de garder le plus proche. Un algorithme avec une telle complexité est évidemment prohibitif pour le lancer de rayons rapide. Nous abordons dans cette section l’extraction d’informations dédiées à la simulation de lancer de rayons à partir d’un modèle EBM-LCC.

5.5.1 Partition Contrainte Convexe de l’Espace (CCSP) pour le lancer de rayons

Dans [102], Maria et al. proposent une nouvelle structure accélératrice pour le lancer de rayons : une partition contrainte convexe de l’espace (CCSP), i.e. une partition de l’espace en respectant la géométrie. L’idée principale est que toute la géométrie appartient aux frontières des volumes de partition. La structure de données requise est un graphe, $G = \langle V, E \rangle$ où V est l’ensemble des volumes convexes vides et E est l’ensemble des faces non occlusives partagées par deux volumes. Chaque volume est décrit par sa topologie en toutes dimen-

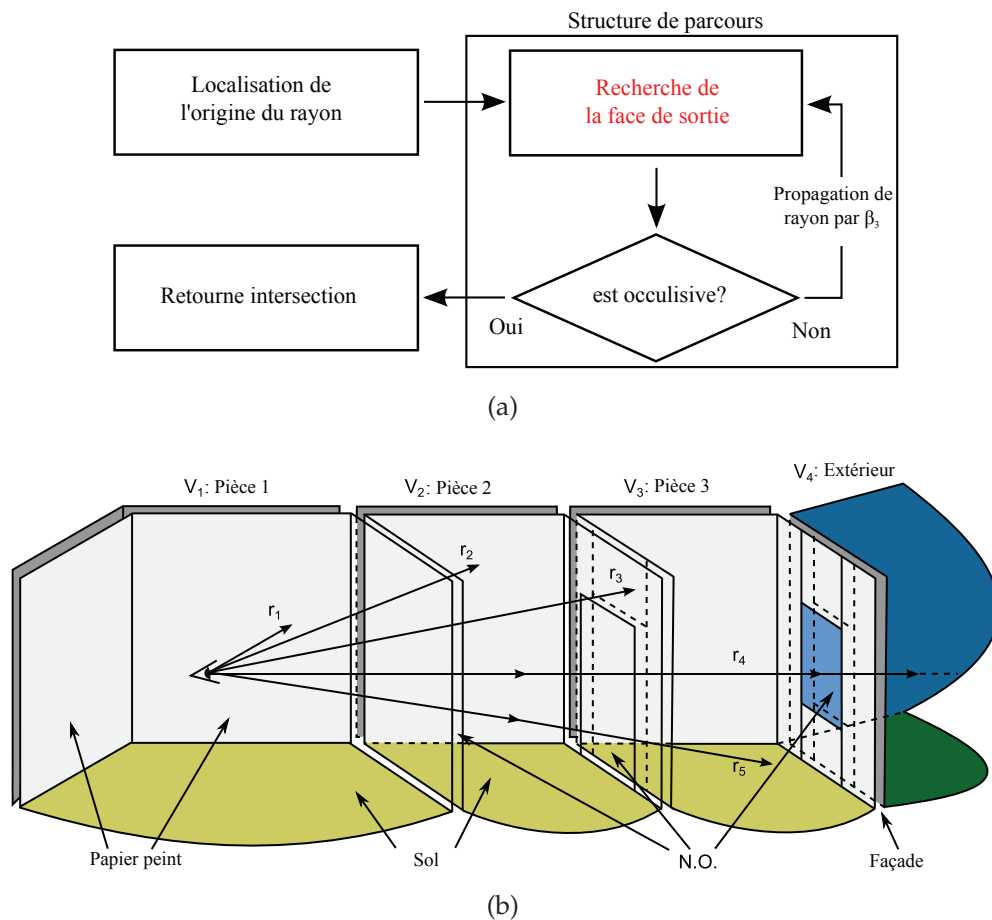


FIGURE 118 – Parcours par CCSP : (a) Pipeline de parcours. (b) Tous les rayons primaires commencent à partir du même volume (V_1) contenant la caméra ; ils sont propagés s'ils frappent une face non-occlusive (N.O.) ou arrêtés sinon. Par exemple, le rayon r_1 frappe directement une face de V_1 de sémantique *Papier peint* alors que le rayon r_4 passe par trois faces N.O. avant d'être propagé dans le volume V_4 de sémantique *Extérieur*.

sions. Cette information topologique permet d'optimiser la recherche de la face de sortie et donc l'algorithme de parcours. En effet, l'algorithme de parcours a une complexité en temps linéaire en fonction du nombre de volumes traversés par le rayon. Le problème le plus important réside dans la recherche de la face de sortie d'un rayon à l'intérieur d'un volume.

5.5.2 Informations requises pour le lancer de rayons

Le principe de l'algorithme de lancer de rayon, illustré sur la figure 118, consiste à lancer des rayons dans la scène de la position de l'œil dans toutes les directions. Afin de suivre le rayon, nous devons trouver l'intersection la plus proche entre ce dernier et la géométrie de la scène. Cela se fait en deux étapes.

Dans un premier temps, il est nécessaire de localiser le volume contenant la position du rayon. Ensuite, le rayon passe à travers la partition, en traversant un volume à la fois jusqu'à frapper une face occlusive. A cet effet, chaque face doit être identifiée avec une sémantique pour savoir si elle est occlusive ou non. En cas de face non-occlusive, cette sémantique décrit la nature de la face, qui est associée à un matériau ou une texture spécifique. En fait, traverser la structure accélératrice et tester les intersections des rayons conduisent au même résultat : déterminer la face de sortie d'un rayon à l'intérieur d'un volume donné. Si cette face est non-occlusive, alors le rayon se propage à travers le volume voisin. Sinon, il est arrêté et l'intersection la plus proche est retourné. La figure 118 résume ce processus.

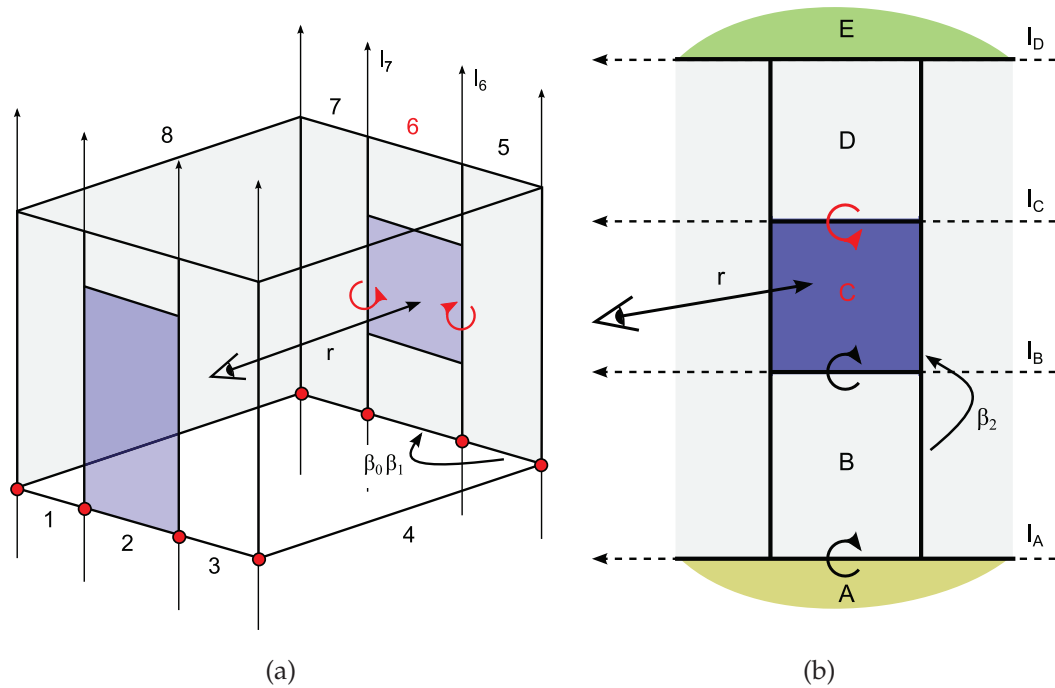


FIGURE 119 – (a) Recherche de section infinie. (b) Recherche de face de sortie.

5.5.3 De l'EBM-LCC au CCSP

Une fois de plus, toutes les informations nécessaires afin d'extraire les données appropriées pour le CCSP sont disponibles dans l'EBM-LCC. Pour résumer, à partir d'un EBM-LCC entièrement connecté, la structure de parcours est optimisée en utilisant les relations topologiques des cellules de toutes les dimensions. Cependant, même si le modèle 3-carte décrit entièrement le CCSP et pourrait être directement utilisé pour le lancer de rayon, il contient encore beaucoup

d'informations inutiles pour l'application visée. Le CCSP est donc directement déduit en analysant le EBM-LCC. Chaque volume devient alors un noeud de CCSP : il correspond à un sous-graphe décrivant la topologie du volume. En d'autres termes, un volume est décrit par ses faces reliées par β_2 , et une face est décrite par ses arêtes reliées par β_1 . Les sommets ne sont pas explicitement représentés car ils sont inutiles pendant le lancer de rayons. Lors de l'extraction de l'information à partir de l'EBM-LCC, chaque face sémantiquement identifiée comme non-occlusive devient une arête reliant son volume actuel à un voisin (connues grâce aux relations β_3). Selon leurs sémantiques, les autres faces sont associées à des matériaux spécifiques.

Les relations topologiques données par l'EBM-LCC sont utilisées à la fois pour le parcours par CCSP et pour l'accélération de la recherche de la face de sortie. Afin de suivre un rayon, quand une intersection est détectée avec une face, dans le cas où cette face est non-occlusive, le rayon se propage à travers le volume voisin, connu directement à partir des liens β_3 . Pour accélérer la recherche de face de sortie, l'approche proposée est divisée en deux étapes. Tout d'abord, le volume est considéré comme un polyèdre infini, ignorant ainsi les faces supérieures et inférieures. Ensuite, la première étape détermine la section de sortie infinie. Cette recherche analyse les arêtes incidentes à la face inférieure à l'aide des liens β_1 . Chaque arête correspond à une section infinie délimitée par deux lignes verticales orientées. Le test d'intersection rayon/section est très rapide car il nécessite seulement deux tests d'orientation : un rayon passe par une section si et seulement si il passe par la droite (resp. gauche) de la ligne délimitante gauche (resp. droite) (cf. figure 119(a)).

La deuxième étape trouve la face de sortie parmi celles qui composent la section de sortie (y compris le sol et le plafond). Chacune de ces faces sont délimitées par deux lignes horizontales orientées de droite à gauche (sens trigonométrique à partir de l'intérieur du volume). Ainsi, cette recherche est effectuée linéairement de bas en haut à l'aide des liens β_2 . La face de sortie est trouvée lorsque le rayon descend en dessous de la ligne de la limite supérieure (cf. figure 119(b)).

5.5.4 Performances du lancer de rayons

La méthode de lancer de rayons que nous étudions ici a été introduite dans [102]. Les scènes présentées dans le tableau 18 sont constituées d'un nombre de polygones entre 1.000 et 500.000. Par exemple, le modèle *Soda hall* meublé est constitué de cinq étages et de 10.000 polygones. Comme expliqué précédemment, la 3-carte peut être utilisée directement pour le lancer de rayons. Mais nous la simplifions pour ne garder que ce dont le lancer de rayons a besoin. La colonne Temps du tableau 18 indique le temps de construction pour générer le CCSP à

partir de la 3-carte.

La structure accélératrice CCSP permet un raycasting primaire très efficace (avec un BRDF diffus) soit sur CPU ou sur GPU. Elle jette près de 500 rayons primaires par secondes sur CPU et plus d'un millier sur GPU. Nous avons comparé les résultats du CCSP avec ceux mesurés avec le noyau de lancer de rayons Embree [163], et avec le lanceur de rayons Aila [6], en utilisant le même ordinateur. Cette approche surpasse ces noyaux de lancer de rayons de l'état de l'art. Par exemple, avec le modèle *Tower* sur CPU, le CCSP produit 92,75FPS contre 14FPS pour Aila. Avec le même modèle sur GPU, nous obtenons 1096,61FPS contre, en moyenne 180FPS. Cependant, le CCSP est particulièrement bien adapté pour les scènes architecturales : elles sont composées de grandes surfaces occlusives, donc un rayon donné n'a qu'à parcourir quelques volumes de trouver l'intersection la plus proche.

Scènes	Nb Pièces	Nb Volumes	Nb Faces	Temps (ms)	Mémoire (Mo)
<i>House</i>	8	510	1,166	7.46	0.45
<i>Lab</i>	46	1,923	8,557	51.43	2.03
<i>Admin</i>	451	7,724	59,682	116.36	7.36
<i>Tower</i>	2,209	94,345	496,057	1929.9	108.9

TABLE 18 – Caractéristiques des scènes : nombre de pièces, volumes, de polygones, temps d'extraction du CCSP à partir de la 3-carte (sur un CPU single core) en millisecondes (ms), et la taille du CCSP en mémoire (Mo).



FIGURE 120 – Plusieurs exemples de rendu avec la structure accélératrice CCSP : pour nos scènes de test (non meublées) le lancer de rayons calcule en moyenne 1.192 FPS sur un NVidia® GeForce® GTX 680. Travaux de [102].

5.6 EXTRACTION AUTOMATIQUE DE NIVEAUX DE DETAIL

Avec la flambée des techniques permettant l'acquisition 3D très détaillée des données de villes virtuelles en 3D, en plus de l'intérêt croissant accordé à ce type de modèle ces dernières années, le concept de la simplification de bâtiment 3D (connu sous le nom de généralisation de modèles 3D) est un sujet qui fait l'objet d'intenses recherches [142, 131, 80, 60]. Il consiste à simplifier les bâtiments 3D complexes pour se retrouver avec des modèles multi-échelle plus légers, avec moins de détails et plus faciles à manipuler. Cette simplification est cruciale pour la visualisation en temps réel et la navigation sur des données de très grande taille, comme c'est souvent le cas pour les données SIG. C'est d'ailleurs dans cet esprit que le standard CityGML a défini ses différents niveaux de détails qui sont les références dans le domaine de la généralisation des bâtiments [115].

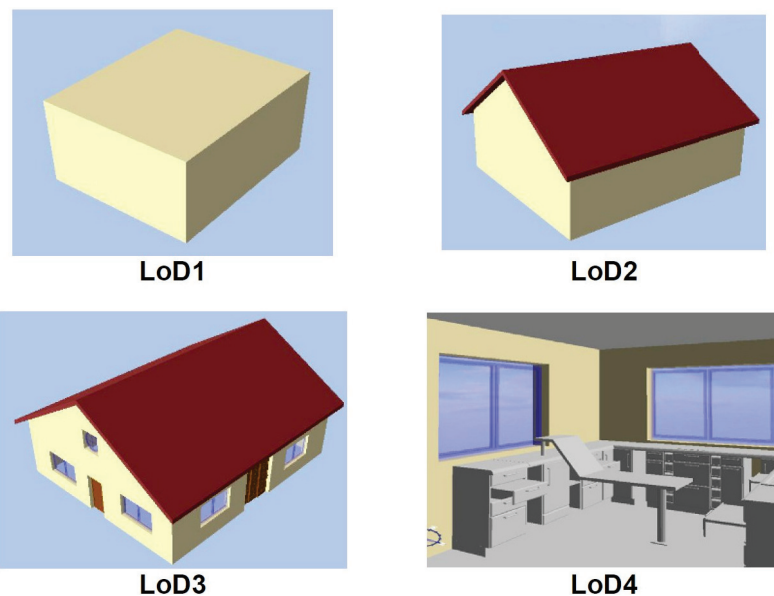


FIGURE 121 – Les différents niveaux de détails pris en compte par le standard CityGML. Images extraites de [60].

Beaucoup de constructions récentes ont déjà des modèles 3D de type BIM ou CAO disponibles. Avec notre méthode de reconstruction, nous proposons d'exploiter ces modèles très détaillés et contenant des données intérieures pour en extraire automatiquement leurs versions simplifiées, tout en préservant leurs formes visuelles autant que possible. Comme l'illustre la figure 121, le niveau LoD1 correspond au bâtiment sous sa forme la plus simplifiée. Il peut être considéré comme une extrusion de l'empreinte au sol du modèle ou tout simplement sa boîte englobante en fonction de sa complexité de forme. Le LoD2 est juste un LoD1 caractérisé par une différenciation de toit. Le LoD3 correspond à la façade qui est la seule partie visible depuis l'extérieur, et enfin LoD4 inclut la représentation des détails intérieurs du bâtiment. Les travaux existants sur la gé-

néralisation se concentrent principalement sur l'extraction des niveaux LoD2 et LoD1 à partir des modèles LoD3. Ce sont en effet les niveaux les plus utilisés à des fins de visualisation et de navigation, mais d'autres méthodes sont explorées pour surmonter les limites tout en traitant d'énormes maquettes [50]. Considérant les modèles de type BIM comme les équivalent des modèles SIG de LoD4, nous présentons notre extraction automatique de LoD3 à LoD1.

5.6.1 Extraction de LoD3 à partir de modèles BIM

De nos jours, de plus en plus de modèles SIG de villes sont reconstruits en LoD3 [59]. En regardant de plus près la définition de ce niveau de détail, il est aisé de constater que l'enveloppe extérieure d'un bâtiment 3D peut être vue comme étant une bonne généralisation en LoD3 de ce dernier [60]. En effet, un bâtiment de LoD3 contient tous les détails de la façade sans rien conserver de l'intérieur du modèle. Cela correspond parfaitement à l'enveloppe externe des modèles que nos deux méthodes de reconstruction produisent. Ainsi, en ne conservant que le volume de l'enveloppe à l'issue de la reconstruction, nous obtenons l'équivalent en LoD3 de notre bâtiment.

Modèles	Nb de faces initial	Nb de faces LoD3	Temps (s)
<i>S-House</i>	840	83 (9,9%)	0,44
<i>Office</i>	5556	411 (7,4%)	20,74
<i>Im-Bureau</i>	8946	88 (0,98%)	71
<i>Craftsman</i>	23726	741 (3,12%)	63,18
<i>Bungalow</i>	18982	481 (2,53%)	52,43

TABLE 19 – Extraction de LoD3 sur des modèles BIM. En dehors de *Im-Bureau* (IFC), tous les autres modèles sont des Collada. *Craftsman* et *Bungalow* ont été obtenus sur la plateforme d'échange de modèles de SketchUp ©[146].

Le tableau 19 présente les résultats de cette extraction de LoD3 sur plusieurs modèles de type BIM. Nous y avons rajouté deux nouveaux modèles Collada, qui permettent de bien mettre en évidence le résultat de la simplification obtenue après l'extraction de l'enveloppe externe. Dans la figure 122, l'ensemble du processus est illustré pour le modèle *Bungalow*. Une première version de l'enveloppe externe est d'abord extraite (cf. figure 122b et 122d), en supprimant tous les volumes contenus à l'intérieur du modèle (cf. figure 122c). Il en résulte un modèle déjà beaucoup plus léger que le modèle de départ (89,5% de réduction du nombre de faces). Ce dernier présentant beaucoup de faces coplanaires à sa surface, peut encore être simplifié grâce à notre opération de fusion des faces co-

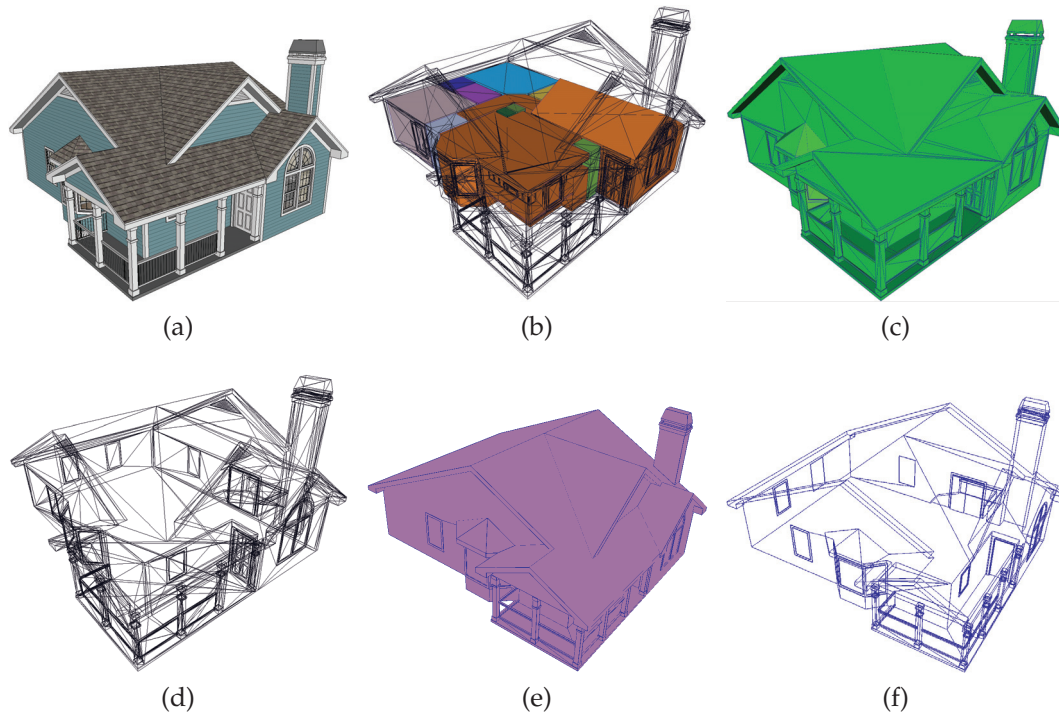


FIGURE 122 – LoD3 du modèle *Bungalow*. (a) Modèle initial texturé. (b) Première enveloppe extraite. (c) Tous les volumes à l'intérieur de la maison. (d) Vue en wireframe de la première enveloppe. (e) 2ème passe de simplification sur l'enveloppe. (f) Modèle LoD3 final (en wireframe).

planaires (cf. section 3.3.5). Cela donne le modèle LoD3 final sur lequel tous les détails de la façade sont présents, mais qui présente 97,47% de faces en moins que le modèle de départ (cf. figures 122e et 122f). Les résultats de l'extraction sur les autres modèles du tableau 19 sont illustrés sur la figure 123. Notons que le LoD3 que nous produisons prend bien en compte toutes les ouvertures sur la façade du modèle, et ce malgré le fait que l'information sémantique ne soit pas sollicitée ici.

5.6.2 Extraction de LoD2 et LoD1 à partir de Modèles BIM

Afin de pousser la généralisation de nos modèles encore plus loin, nous proposons d'extraire les deux niveaux de détails restants, à savoir le LoD2 et le LoD1. Notre approche, pour y arriver, se base principalement sur les toitures des bâtiments traité, similairement à l'approche utilisée par Fan et al. [59]. En effet le LoD ne requiert aucun détail de la façade, si ce n'est la forme du toit et les murs tout autour. Par conséquent l'approche qui consiste à identifier les faces supérieure du toit du modèle puis à extruder leurs frontières jusqu'au plan au sol est pertinente pour proposer du LoD2. La figure 124 illustre le résultat sur le modèle *S-House*. Le toit est laissé dans la figure uniquement pour visualiser la

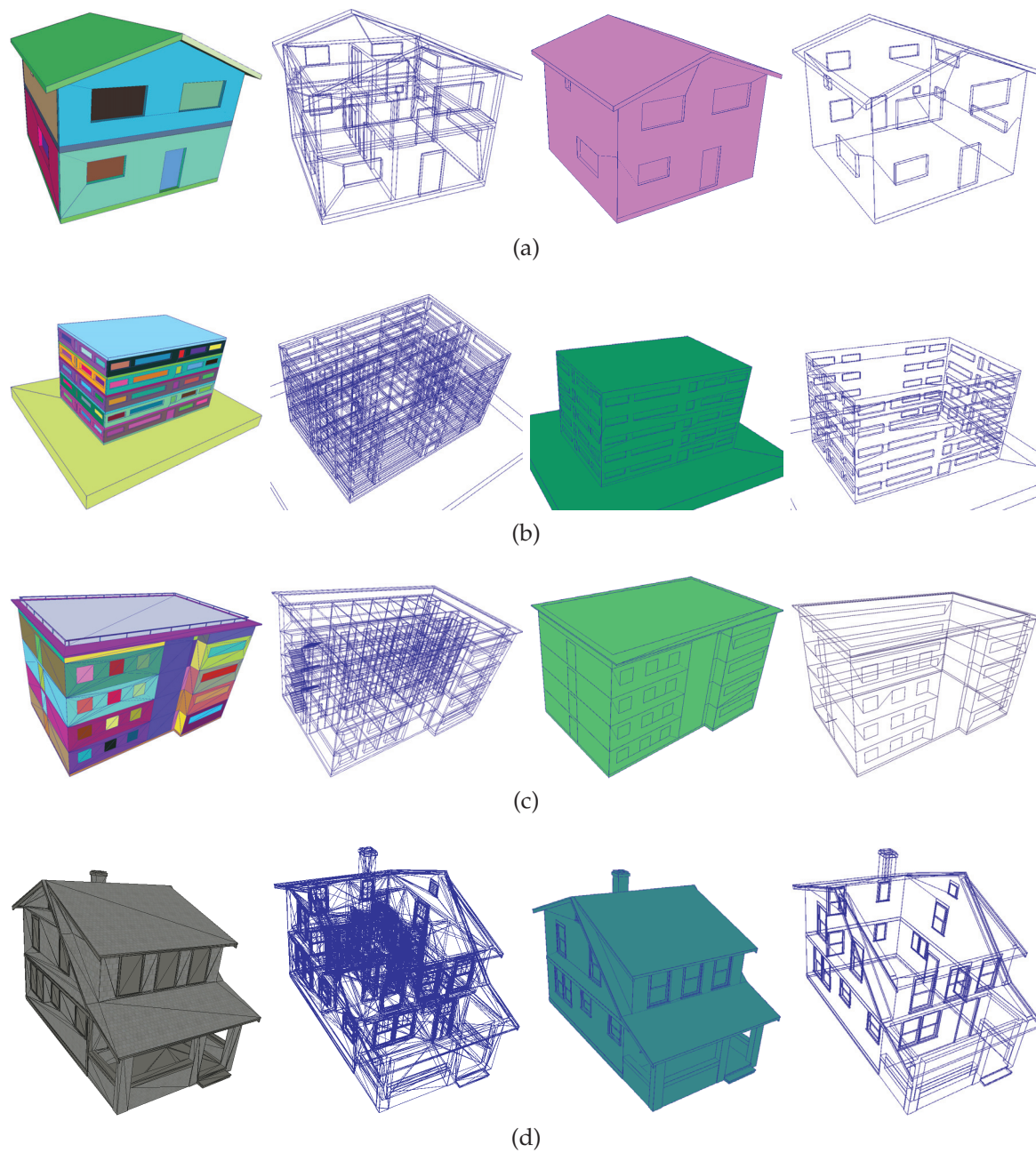


FIGURE 123 – LoD3 des modèles du tableau 19. De gauche à droite : modèle initial ; vu en wireframe du modèle initial ; LoD3 extrait ; vue en wireframe du modèle LoD3. (a) *S-House*. (b) *Office*. (c) *Im-Bureau*. (d) *Craftsman*.

différence entre les deux LoD générés, mais il n'est pas conservé. Le toit de ce modèle étant simplement détectable, avec ou sans information sémantique, l'approche produit le LoD2 avec succès. Cela devient moins trivial lorsqu'il s'agit de toits composés, mal définis ou qui s'intersectent avec d'autres toits. Nous ne traitons pas ce genre de problèmes ici. Pour ce qui est de la production du LoD1, pour beaucoup de modèles la boîte englobante suffit (cf. figures 124c et 124d). En effet, ce niveau de détail ne nécessite pas de différenciation des toitures.

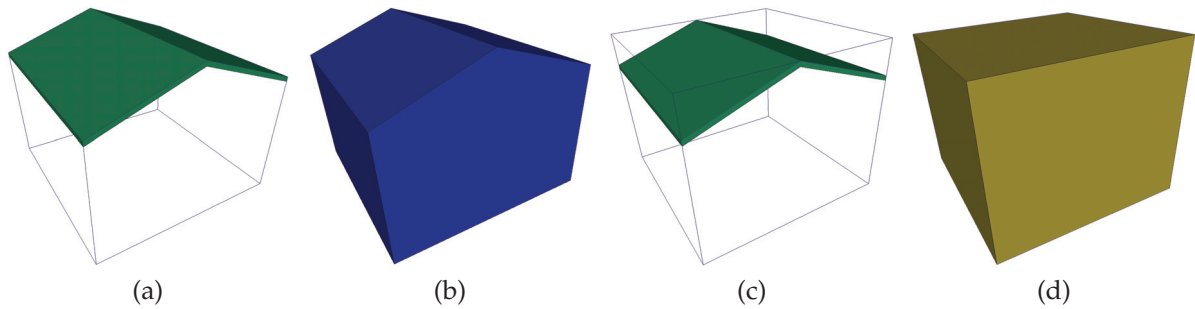


FIGURE 124 – Extraction de LoD2 et LoD1 à partir du toit sur le modèle *S-House*. (a) Extrusion du toit jusqu'à la hauteur $z = 0$. (b) LoD2 extraite. (c) Boîte englobante du modèle. (d) LoD1 obtenu.

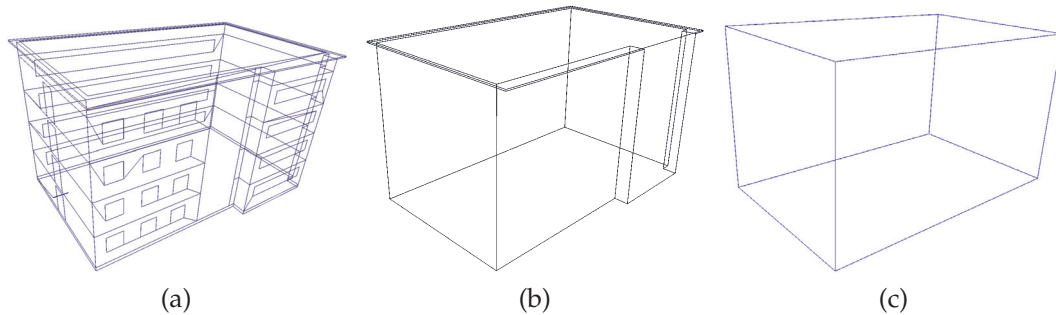


FIGURE 125 – Extraction de LoD2 et LoD1 par simplification du LoD3 sur le modèle *Im-Bureau*. (a) LoD3. (b) LoD2. (c) LoD1 (boîte englobante du modèle).

Une approche alternative pour extraire le LoD2 consiste à simplifier directement le LoD3 reconstruit à partir du même modèle. En effet, la principale différence entre les deux étant les détails de la façade (portes, fenêtres, balcons, etc), en simplifiant la façade du LoD3 nous obtenons par conséquent le LoD2. La figure 125 illustre l'opération sur le LoD3 du modèle *Im-Bureau*. Ce dernier présente un LoD3 sans creux au niveau des ouvertures du fait de sa reconstruction avec l'option de bouchage des trous de la 3SR. Cette option crée des ouvertures qui remplissent entièrement les trous et comble les parties creuses sur les surfaces planes. Par conséquent une simplification de l'enveloppe du modèle qu'elle fournie mène à l'obtention d'un LoD2 comme illustré par la figure 125b.

CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

*Why do you look so sad and forsaken ?
When one door is closed, don't you know another is opened ?*

— Bob Marley

Nous avons présenté dans le cadre de cette thèse une approche générique permettant d'enrichir automatiquement les modèles 3D de bâtiments de types BIM ou SIG, et d'en extraire des informations adaptées pour différentes applications dédiées, comme par exemple l'analyse du bâtiment, des opérations de simulations ou d'affichages simplifiées. À partir de la description géométrique des modèles, correspondant à un ensemble de polygones non connectés dans l'espace, nous effectuons une subdivision spatiale du bâtiment pour obtenir un ensemble de cellules en utilisant le formalisme des 3-cartes. Les relations d'incidence et d'adjacence entre ces cellules sont ensuite reconstruites pour obtenir un LCC entièrement connecté et qui stocke explicitement toutes les relations topologiques entre les éléments du bâtiment. Sur la base de la topologie reconstruite et avec la géométrie en plus, des étiquettes sémantiques sont automatiquement attribuées à chaque composant des modèles grâce à des règles heuristiques prédéfinies. Nous obtenons alors un EBM-LCC enrichie en informations géométriques, topologiques et sémantiques et à partir duquel un nombre considérable d'applications peut tirer profit. Nous avons ainsi utilisé l'EBM-LCC pour extraire des informations dédiées à de la simulation acoustique et à du lancer de rayons. Nous avons également pu extraire plusieurs niveaux de détails à partir des modèles détaillés reconstruits. Toutes ces opérations peuvent être effectuées sur un même EBM-LCC, démontrant par là l'intérêt et le fort potentiel qu'offre un modèle unifié comportant de la géométrie de la topologie et de la sémantique.

BILAN

Notre approche, à travers ses différentes contributions, présente plusieurs avantages comparée à ce qui a été proposée dans la littérature jusque là :

- elle constitue une méthode générique permettant la reconstruction de l'information topologique d'un modèle 3D de bâtiment, qu'il soit de type BIM ou SIG, uniquement à partir de la géométrie de ce dernier ;
- elle offre un ensemble d'opérations basées sur les cartes combinatoires, ce qui lui donne un cadre solide permettant de garantir la validité topologique des résultats obtenus ;

- elle permet l'indentification sémantique automatique des principaux composants structurels d'un bâtiment grâce à un système flexible de création de règles heuristiques basées sur la géométrie et la topologie reconstruite ;
- elle permet l'extraction de données dédiées à plusieurs opérations de simulation comme l'acoustique et l'éclairage ;
- et elle permet de simplifier des modèles complexes en extrayant différents niveaux de détails à partir d'un modèle 3D détaillé.

Force est de constater qu'aujourd'hui, dans l'industrie de la construction, il y a un manque flagrant d'interopérabilité des données utilisées par les nombreux et différents acteurs qui interviennent dans un même projet. Ce problème, qui s'explique par le manque d'informations adaptées, touche particulièrement les experts chargés de mener des analyses techniques sur les modèles de bâtiment. Nos travaux qui s'attaquent clairement à ce problème d'interopérabilité constitue une voie très prometteuse. Notre méthode se présente ainsi comme un pont solide entre les modèles de bâtiment et les applications qui les utilisent.

Les deux principales forces de nos travaux sont d'une part la genericité et d'autre part la flexibilité. Nous parlons de genericité car notre approche permet de traiter de manière indifférente la reconstruction topologique des modèles BIM ou SIG, quel que soit le format de ces derniers, tant qu'ils contiennent une description géométrique. Cela est dû à la genericité des cartes combinatoires qui nous permet de faire usage du même formalisme pour définir des opérations en toute dimension. Nous parlons de flexibilité car notre méthode de définition des règles heuristiques pour l'identification sémantique est entièrement modifiable et personnalisable, cela afin de définir des règles adaptées en fonction des particularités des bâtiments traités. Enfin, à partir d'une même structure unifiée, que constitue le EBM-LCC, toute une panoplie d'applications est possible, et sont procédées de manière simple.

Nous avons ainsi testé notre approche sur plusieurs types de modèles BIM et SIG pour démontrer sa genericité. Nous avons également montré comment extraire des informations dédiées pour des applications de simulation à partir du modèle enrichi. À titre d'exemple, nous avons produit des informations pour les processus de simulation acoustique et de lancer de rayons interactif. Par ailleurs, nos algorithmes ont été faits de manière robuste pour faire faces aux nombreux problèmes communément rencontrés dans les modèles 3D de bâtiment.

PERSPECTIVES

Notre approche présente néanmoins des limitations qu'il serait intéressant d'étudier afin de l'améliorer. En effet, bien que nous ayons pu tester plusieurs types de modèles durant nos travaux, il serait intéressant de procéder à une

étude à plus grande échelle, avec des tests sur un plus grand nombre de modèles décrivant des bâtiments. Cependant, un problème majeur se pose et concerne la qualité des informations disponibles dans les modèles. Il est connu dans le domaine du traitement des données de modèle bâtiment, et particulièrement pour les BIM, que la qualité et la fiabilité des informations laisse à désirer. Comme nous avons pu le constater dans notre chapitre d'expérimentations (cf. chapitre 5), un nombre considérable de situations peut corrompre l'information topologique et sémantique. Cela oblige, quiconque désire un modèle propre et cohérent, à le créer de lui même, ce qui est en contradiction avec l'idée d'interopérabilité. Pour résoudre cette limitation, nous envisageons d'étudier des méthodes de validation et de correction des modèles bâtiments. Une piste intéressante pourrait être l'application d'opérations booléennes entre tous les composants du modèle pour obtenir un partitionnement de l'espace plus propre.

Une autre piste à étudier est la détermination automatique des valeurs ϵ à utiliser comme marges d'erreurs dans nos calculs. En effet, les valeurs que nous avons utilisé tout au long de nos tests ont été déterminées de manière empirique et retenues comme donnant les meilleurs résultats sur plusieurs tests. Cela constitue une limite gênante, vu l'impact que ce choix a sur les résultats des opérations. Mais il faut noter que la détermination automatique de ces valeurs n'est pas un problème trivial et nécessite de prendre en compte les spécificités de chaque modèle traité.

Par ailleurs, les nombreuses possibilités offertes par un EBM-LCC entièrement connecté sont encore loin d'être toutes explorées. En effet, beaucoup d'autres applications intéressantes peuvent être considérées dans le cadre de la simulation, comme par exemple la simulation énergétique du bâtiment. Une autre application envisagée est l'extraction de graphe de navigation dans lequel les informations des pièces et leur connexion pourrait être directement explorées pour extraire des itinéraires adaptés pour des utilisateurs ciblés.

Notre outil pourrait aussi être utilisé comme support pour améliorer la cohérence des informations contenu dans les modèles standard IFC et CityGML en aidant à comparer/valider les données existantes, ou compléter celles manquantes. Enfin, comme la quantité de données est en rapide croissance, même pour un modèle d'un bâtiment seul, la capacité d'adaptation de nos outils à la problématique des grosses données est également un sujet à étudier.

Les résultats obtenus dans le cadre de cette thèse ainsi que les nombreuses perspectives qui s'ouvrent à son issue confirment le fort potentiel et l'intérêt majeur se trouvant dans l'utilisation des cartes combinatoires pour la modélisation de bâtiments. Et bien que nous ayons pu montrer la force de cette structure à tra-

vers des problématiques de manipulation, de correction et de simulation autour des modèles de bâtiments, elle a encore bien plus d'un atout à faire valoir.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] Pankaj K Agarwal and Micha Sharir. Arrangements and their applications. *Handbook of computational geometry*, pages 49–119, 2000.
- [2] Alexander Agathos, Ioannis Pratikakis, Stavros Perantonis, Nikolaos Sapidis, and Philip Azariadis. 3d mesh segmentation methodologies for cad applications. *Computer-Aided Design and Applications*, 4(6) :827–841, 2007.
- [3] Christian Ah-Soon and Karl Tombre. Architectural symbol recognition using a network of constraints. *Pattern Recognition Letters*, 22(2) :231–248, 2001.
- [4] A. Ahmad and L. Rabiou. Generation of three dimensional model of building using photogrammetric technique. In *Signal Processing and its Applications (CSPA), 2011 IEEE 7th International Colloquium on*, pages 225–231, March 2011.
- [5] Ali Aien, SAEID KALANTARI SOLTANIEH, Abbas Rajabifard, Ian Williamson, and Rohan Bennett. Advanced principles of 3d cadastral data modelling. FIG, 2011.
- [6] Timo Aila, Samuli Laine, and Tero Karras. Understanding the efficiency of ray traversal on GPUs – Kepler and Fermi addendum. NVIDIA Technical Report NVR-2012-02, NVIDIA Corporation, June 2012.
- [7] N. Alam, D. Wagner, M. Wewetzer, J. von Falkenhausen, V. Coors, and M. Pries. Towards automatic validation and healing of citygml models for geometric and semantic consistency. *ISPRS Annals of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, II-2/W1 :1–6, 2013. doi : 10.5194/isprsannals-II-2-W1-1-2013. URL <http://www.isprs-ann-photogramm-remote-sens-spatial-inf-sci.net/II-2-W1/1/2013/>.
- [8] Gianni Antini, Stefano Berretti, P Pala, et al. 3d mesh partitioning for retrieval by parts applications. In *Multimedia and Expo, 2005. ICME 2005. IEEE International Conference on*, pages 1210–1213. IEEE, 2005.
- [9] Yusuf Arayici. Towards building information modelling for existing structures. *Structural Survey*, 26(3) :210–222, 2008.
- [10] Marco Attene, Francesco Robbiano, Michela Spagnuolo, and Bianca Falcidieno. Characterization of 3d shape parts for semantic annotation. *Computer-Aided Design*, 41(10) :756–763, 2009.

- [11] Yudi Nugraha Bahar, Christian Pere, Jérémie Landrieu, and Christophe Nicolle. A thermal simulation tool for building and its interoperability through the building information modeling (bim) platform. *Buildings*, 3 (2) :380–398, 2013.
- [12] Joachim Bauer, Konrad Karner, Andreas Klaus, Christopher Zach, and Konrad Schindler. *Segmentation of building models from dense 3D point-clouds*. na, 2003.
- [13] V. Bazjanac. Space boundary requirements for modeling of building geometry for energy and other performance simulation. In *CIB W78 : 27th International Conference*, 2010.
- [14] Vladimir Bazjanac. Ifc bim-based methodology for semi-automated building energy performance simulation. *Lawrence Berkeley National Laboratory*, 2008.
- [15] Susanne Becker and Norbert Haala. Grammar supported facade reconstruction from mobile lidar mapping. In *ISPRS Workshop, CMRT09-City Models, Roads and Traffic*, volume 38, page 13, 2009.
- [16] Dmitriy Bespalov, William C Regli, and Ali Shokoufandeh. Local feature extraction and matching partial objects. *Computer-Aided Design*, 38(9) :1020–1037, 2006.
- [17] Silvia Biasotti, Simone Marini, Michela Mortara, et al. An overview on properties and efficacy of topological skeletons in shape modelling. In *null*, page 245. IEEE, 2003.
- [18] Peter Biber, Sven Fleck, D Staneker, M Wand, and Wolfgang Straßer. First experiences with a mobile platform for flexible 3d model acquisition in indoor and outdoor environments—the waegele. *ISPRS Working Group*, 4, 2005.
- [19] Roland Billen, Siyka Zlatanova, Pierre Mathonet, and Fabien Boniver. The dimensional model : a framework to distinguish spatial relationships. In *Advances in Spatial Data Handling*, pages 285–298. Springer, 2002.
- [20] P. Boguslawski and C. Gold. Rapid modelling of complex building interiors. In Thomas H. Kolbe, Gerhard König, and Claus Nagel, editors, *Advances in 3D Geo-Information Sciences*, Lecture Notes in Geoinformation and Cartography, pages 43–56. Springer Berlin Heidelberg, 2011.
- [21] Pawel Boguslawski, Christopher M Gold, and Hugo Ledoux. Modelling and analysing 3d buildings with a primal/dual data structure. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 66(2) :188–197, 2011.

- [22] Jan Böhm. Facade detail from incomplete range data. In *Proceedings of the ISPRS Congress, Beijing, China*, volume 1, page 2, 2008.
- [23] Jan Böhm, Claus Brenner, Jens Gühring, and Dieter Fritsch. Automated extraction of features from cad models for 3d object recognition. In *in ISPRS Congress 2000*. Citeseer, 2000.
- [24] Jan Böhm, Susanne Becker, and Norbert Haala. Model refinement by integrated processing of laser scanning and photogrammetry. *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 36(5) :W47, 2007.
- [25] A Borrmann. From gis to bim and back again—a spatial query language for 3d building models and 3d city models. In *5th international 3D geoinfo conference, BerlinV*, 2010.
- [26] A. Borrmann and E. Rank. Topological Operators in a 3D Spatial Query Language for Building Information Models. In *Proc. of the 12th ICCCB*, 2008.
- [27] A. Boulch, S. Houllier, R. Marlet, and O. Tournaire. Semantizing Complex 3D Scenes using Constrained Attribute Grammars. *Comp. Graph. Forum* 2013,, 32(5) :33–42, 2013.
- [28] Paul Bourke. Calculating the area and centroid of a polygon, 1988.
- [29] E. Brisson. Representing geometric structures in d dimensions : Topology and order. In *Proceedings of the Fifth Annual Symposium on Computational Geometry, SCG '89*, pages 218–227. ACM, 1989.
- [30] Christopher WS Bruner. Geometric properties of arbitrary polyhedra in terms of face geometry. *AIAA journal*, 33(7) :1350–1350, 1995.
- [31] Angela Budroni and Jan Boehm. Automated 3d reconstruction of interiors from point clouds. *International Journal of Architectural Computing*, 8(1) : 55–73, 2010.
- [32] Angela Budroni and Jan Böhm. Automatic 3d modelling of indoor manhattan-world scenes from laser data. In *ISPRS Symp. Close Range Image Measurement Techniques*, volume 2, 2010.
- [33] Building SMART International. Industry Foundation Classes (IFC), IFC4, 2013. <http://www.buildingsmart.org/standards/ifc>.
- [34] CFD-online. Arbitrary polyhedral volume - Computational Fluid Dynamics, Dernière visite en juillet 2015. URL http://www.cfd-online.com/Wiki/Arbitrary_polyhedral_volume.

- [35] Yi-Feng Chang and Shen-Guan Shih. Bim-based computer-aided architectural design. *Computer-Aided Design and Applications*, 10(1) :97–109, 2013.
- [36] Liang Cheng, Jianya Gong, Manchun Li, and Yongxue Liu. 3d building model reconstruction from multi-view aerial imagery and lidar data. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 77(2) :125–139, 2011.
- [37] Jinmu Choi and Jiyeong Lee. 3D Geo-Network for Agent-based Building Evacuation Simulation. In *3D Geo-Information Sciences, Lecture Notes in Geoinformation and Cartography*, pages 283–299. Springer Berlin Heidelberg, 2009.
- [38] Satyan Coorg and Seth Teller. Extracting textured vertical facades from controlled close-range imagery. In *Computer Vision and Pattern Recognition, 1999. IEEE Computer Society Conference on.*, volume 1. IEEE, 1999.
- [39] James M Coughlan and Alan L Yuille. Manhattan world : Compass direction from a single image by bayesian inference. In *Computer Vision, 1999. The Proceedings of the Seventh IEEE International Conference on*, volume 2, pages 941–947. IEEE, 1999.
- [40] Francis Crick. Bim show live, Dernière visite en septembre 2012. URL <http://www.hoklife.com/2012/05/25/bim-from-texas-to-london/>.
- [41] CSTB. Acoubat, 2015. <http://logiciels.cstb.fr/Acoustique-Acoubat>.
- [42] Umberto Cugini, G Ferri, Piero Mussio, and Marco Protti. Pattern-directed restoration and vectorization of digitized engineering drawings. *Computers & graphics*, 8(4) :337–350, 1984.
- [43] Guillaume Damiand. Combinatorial maps. In *CGAL User and Reference Manual*. CGAL Editorial Board, 4.4 edition, 2000. http://doc.cgal.org/latest/Combinatorial_map/index.htm.
- [44] Guillaume Damiand. Linear cell complex. In *CGAL User and Reference Manual*. CGAL Editorial Board, 4.4 edition, 2000. http://doc.cgal.org/latest/Linear_cell_complex/index.html.
- [45] Guillaume Damiand and Pascal Lienhardt. *Combinatorial maps : efficient data structures for computer graphics and image processing*. CRC Press, 2014.
- [46] S. Daum and A. Borrmann. Efficient and robust octree generation for implementing topological queries for building information models. In *Proc. of the EG-ICE Workshop on Intelligent Computing in Engineering*, pages 370–385, 2012.

- [47] Simon Daum and André Borrmann. Checking spatio-semantic consistency of building information models by means of a query language. In *Thirteenth International Conference on Construction Applications of Virtual Reality*, pages 492–501, 2013.
- [48] Tarcisio Mendes De Farias, Ana Roxin, and Christophe Nicolle. A rule based system for semantical enrichment of building information exchange. In *RuleML 2014*, volume 1211, page 2, 2014.
- [49] N Demir and E Baltsavias. Automated modeling of 3d building roofs using image and lidar data. In *Proceedings of the XXII Congress of the International Society for Photogrammetry, Remote Sensing, Melbourne, Australia*, volume 25, 2012.
- [50] Marco Di Benedetto, Paolo Cignoni, Fabio Ganovelli, Enrico Gobbetti, Fabio Marton, and Roberto Scopigno. Interactive remote exploration of massive cityscapes. In *Proceedings of the 10th Int. Conf. on Virtual Reality, Archaeology and Cultural Heritage*, pages 9–16. Eurographics Association, 2009.
- [51] Dictionnaire de Français Larousse. Définitions : épaisseur, Dernière visite en juin 2015. URL <http://www.larousse.fr/dictionnaires/francais/%C3%A9paisseur/30214>.
- [52] B. Domínguez, Á. L. García, and Francisco R. Feito. Semantic and topological representation of building interiors - an overview. In *GRAPP/IVAPP*, pages 169–174, 2012.
- [53] Sjors Donkers, Hugo Ledoux, Junqiao Zhao, and Jantien Stoter. Automatic conversion of ifc datasets to geometrically and semantically correct citygml lod3 buildings. *Transactions in GIS*, 2015.
- [54] Philippe Dosch, Karl Tombre, Christian Ah-Soon, and Gérald Masini. A complete system for the analysis of architectural drawings. *International Journal on Document Analysis and Recognition*, 3(2) :102–116, 2000.
- [55] M. J. Egenhofer and R. Franzosa. Point-set topological spatial relations. *International Journal of Geographic Information Systems*, 5(2) :161–174, 1991.
- [56] Mohamed El-Mehalawi and R Allen Miller. A database system of mechanical components based on geometric and topological similarity. part i : representation. *Computer-Aided Design*, 35(1) :83–94, 2003.
- [57] C. Ellul and M. M. Haklay. Using a b-rep structure to query 9-intersection topological relationships in 3d gis - reviewing the approach and improving performance. In *3D Geo-Information Sciences, Lecture Notes in Geoinformation and Cartography*, pages 127–151. Springer Berlin Heidelberg, 2009.

- [58] Engineering and Technology Magazine. Building information modelling - dna for buildings, Dernière visite en septembre 2015. URL <http://eandt.theiet.org/magazine/2013/01/building-metabolism.cfm>.
- [59] Hongchao Fan and Liqui Meng. A three-step approach of simplifying 3D buildings modeled by CityGML. *Int. Journal of Geographical Information Science*, 26(6) :1091–1107, 2012.
- [60] Hongchao Fan, Liqui Meng, and Mathias Jahnke. Generalization of 3D Buildings Modelled by CityGML. In *Advances in GIScience, Lecture Notes in Geoinformation and Cartography*, pages 387–405. Springer Berlin Heidelberg, 2009.
- [61] Martin A Fischler and Robert C Bolles. Random sample consensus : a paradigm for model fitting with applications to image analysis and automated cartography. *Communications of the ACM*, 24(6) :381–395, 1981.
- [62] D. Fradin, D. Meneveau, and P. Lienhardt. A Hierarchical Topology-Based Model for Handling Complex Indoor Scenes. *Computer Graphics Forum*, 25(2) :149–162, June 2006.
- [63] Christian Frueh, Siddharth Jain, and Avidesh Zakhori. Data processing algorithms for generating textured 3d building facade meshes from laser scans and camera images. *International Journal of Computer Vision*, 61(2) :159–184, 2005.
- [64] Paolo Gamba and Bijan Houshmand. Digital surface models and building extraction : a comparison of ifsar and lidar data. *Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transactions on*, 38(4) :1959–1968, 2000.
- [65] G. Gröger and L. Plümer. How to achieve consistency for 3d city models. *GeoInformatica*, 15(1) :137–165, 2011. ISSN 1384-6175. doi : 10.1007/s10707-009-0091-6. URL <http://dx.doi.org/10.1007/s10707-009-0091-6>.
- [66] Leonidas Guibas and Jorge Stolfi. Primitives for the manipulation of general subdivisions and the computation of voronoi. *ACM transactions on graphics (TOG)*, 4(2) :74–123, 1985.
- [67] Norbert Haala and Claus Brenner. Extraction of buildings and trees in urban environments. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 54(2) :130–137, 1999.
- [68] Benjamin Hagedorn, Matthias Trapp, Tassilo Glander, and Jurgen Dollner. Towards an indoor level-of-detail model for route visualization. In *Mobile Data Management : Systems, Services and Middleware, 2009. MDM'09. Tenth International Conference on*, pages 692–697. IEEE, 2009.

- [69] D. Hähnel, W. Burgard, and S. Thrun. Learning compact 3d models of indoor and outdoor environments with a mobile robot. *Robotics and Autonomous Systems*, 44(1) :15–27, 2003.
- [70] Dirk Hähnel, Wolfram Burgard, and Sebastian Thrun. Learning compact 3d models of indoor and outdoor environments with a mobile robot. *Robotics and Autonomous Systems*, 44(1) :15–27, 2003.
- [71] F. Han and S.-C. Zhu. Bayesian reconstruction of 3d shapes and scenes from a single image. *Proceedings of the first IEEE international workshop on higher-level knowledge in 3D modeling and motion analysis*, page 12, 2003.
- [72] Ihab Hijazi, Manfred Ehlers, Sisi Zlatanova, and Umit Isikdag. Ifc to citygml transformation framework for geo-analysis : a water utility network case. In *4th International Workshop on 3D Geo-Information, 4-5 November 2009, Ghent, Belgium*, 2009.
- [73] Xavier Hilaire and Karl Tombre. Robust and accurate vectorization of line drawings. *Pattern Analysis and Machine Intelligence, IEEE Transactions on*, 28(6) :890–904, 2006.
- [74] Robert J Hitchcock and Justin Wong. Transforming ifc architectural view bims for energy simulation : 2011. In *Proceedings of building simulation*, 2011.
- [75] S. Horna, D. Meneveaux, G. Damiand, and Y. Bertrand. Consistency constraints and 3D building reconstruction. *Computer-Aided Design*, 41(1) : 13–27, 2009.
- [76] Sebastien Horna, Guillaume Damiand, Daniel Meneveaux, and Yves Bertrand. Building 3d indoor scenes topology from 2d architectural plans. In *GRAPP (GM/R)*, pages 37–44. Citeseer, 2007.
- [77] Yong Hu. *Automated extraction of digital terrain models, roads and buildings using airborne LiDAR data*, volume 69. 2004.
- [78] Umit Isikdag, Sisi Zlatanova, and Jason Underwood. A bim-oriented model for supporting indoor navigation requirements. *Computers, Environment and Urban Systems*, 41 :112–123, 2013.
- [79] Philipp Jenke, Benjamin Huhle, and Wolfgang Straßer. Statistical reconstruction of indoor scenes. In *Proceedings of the 17th International Conference in Central Europe on Computer Graphics, Visualization and Computer Vision (WSCG)*, pages 17–24, 2009.
- [80] Martin Kada. Generalisation of 3D building models by cell decomposition and primitive instancing. In *Proc. of the Joint ISPRS Workshop on Visualization and Exploration of Geospatial Data*, Stuttgart, Germany, 2007.

- [81] Peter Kamnitzer. Computer aid to design. *Architectural Design*, 39 :507–509, 1969.
- [82] Sudarshan Karki, Rod Thompson, and Kevin McDougall. Data validation in 3d cadastre. In *Developments in 3D geo-information sciences*, pages 92–122. Springer, 2010.
- [83] Kouros Khoshelham and Lucia Díaz-Vilariño. 3d modeling of interior spaces : Learning the language of indoor architecture. In *Proceedings of the ISPRS Technical Commission V Symposium, Riva del Garda, Italy*, volume 2325, 2014.
- [84] Karl Kraus and Norbert Pfeifer. Determination of terrain models in wooded areas with airborne laser scanner data. *ISPRS Journal of Photogrammetry and remote Sensing*, 53(4) :193–203, 1998.
- [85] Florent Lafarge and Clément Mallet. Creating large-scale city models from 3d-point clouds : a robust approach with hybrid representation. *International journal of computer vision*, 99(1) :69–85, 2012.
- [86] Florent Lafarge, Xavier Descombes, Josiane Zerubia, and Marc Pierrot Deseilligny. Structural approach for building reconstruction from a single DSM. *IEEE Trans. on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 32(1) :135–147, 2010.
- [87] Florent Lafarge, Renaud Keriven, Mathieu Brédif, and Vu Hoang Hiep. Hybrid multi-view reconstruction by jump-diffusion. In *Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), 2010 IEEE Conference on*, pages 350–357. IEEE, 2010.
- [88] H. Ledoux and C. M. Gold. Simultaneous storage of primal and dual three-dimensional subdivisions. *Computers, Environment and Urban Systems*, 31 (4) :393–408, 2007.
- [89] Hugo Ledoux. On the validation of solids represented with the international standards for geographic information. *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, 28(9) :693–706, 2013.
- [90] Hugo Ledoux, Ken Arroyo Ohori, and Martijn Meijers. A triangulation-based approach to automatically repair GIS polygons. *Computers & Geosciences*, 66 :121–131, 2014.
- [91] Rick Lewis and Carlo Séquin. Generation of 3d building models from 2d architectural plans. *Computer-Aided Design*, 30(10) :765 – 779, 1998.
- [92] D. Liebowitz, A. Criminisi, and A. Zisserman. Creating architectural models from images. *Annual conference of the European association for computer graphics (eurographics)*, vol. 18 :39, 1999.

- [93] P. Lienhardt. N-Dimensional Generalized Combinatorial Maps and Cellular Quasi-Manifolds. *Int. J. Comput. Geometry Appl.*, 4(3) :275–324, 1994.
- [94] Pascal Lienhardt. Topological models for boundary representation : a comparison with n-dimensional generalized maps. *Computer-aided design*, 23 (1) :59–82, 1991.
- [95] L. Liu and I. Stamos. Automatic 3d to 2d registration for the photorealistic rendering of urban scenes. *Proceedings of IEEE computer society conference on computer vision and pattern recognition*, Volume 2 :137, 2005.
- [96] L. Liu and I. Stamos. A systematic approach for 2d-image to 3d-range registration in urban environments. *The international conference on computer vision*, page 1, 2007.
- [97] L Liu and S Zlatanova. A "door-to-door" path-finding approach for indoor navigation. In *Proceedings GI4DM 2011 : GeoInformation for Disaster Management, Antalya, Turkey, 3-8 May 2011*. International Society for Photogrammetry and Remote Sensing (ISPRS), 2011.
- [98] Tong Lu, Chiew-Lan Tai, Li Bao, Feng Su, and Shijie Cai. 3d reconstruction of detailed buildings from architectural drawings. *Computer-Aided Design and Applications*, 2, 01 2005.
- [99] Tong Lu, Chiew-Lan Tai, Feng Su, and Shijie Cai. A new recognition model for electronic architectural drawings. *Computer-Aided Design*, 37(10) :1053–1069, 2005.
- [100] Ali Malkawi and Godfried Augenbroe. *Advanced building simulation*. Routledge, 2004.
- [101] Marvin L. Manheim. Role of the computer in the design process. *Building Research*, 3 :13–17, March-April 1966.
- [102] Maxime Maria, Sébastien Horna, and Lilian Aveneau. Topological Space Partition for Fast Ray Tracing in Architectural Models. In *GRAPP 2014 - 9th International Joint Conference on Computer Graphics Theory and Applications*, pages 225 – 235, Lisbon, Portugal, January 2014. URL <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00938335>.
- [103] Wiet Mazairac and Jakob Beetz. Bimql—an open query language for building information models. *Advanced Engineering Informatics*, 27(4) :444–456, 2013.
- [104] M Meijers, S Zlatanova, and N Pfeifer. 3d geoinformation indoors : structuring for evacuation. In *Proceedings of Next generation 3D city models*, pages 21–22, 2005.

- [105] Claudio Mura, Oliver Mattausch, Alberto Jaspe Villanueva, Enrico Gobetti, and Renato. Automatic room detection and reconstruction in cluttered indoor environments with complex room layouts. *Computers & Graphics*, 44(0) :20 – 32, 2014.
- [106] C. Nagel, A. Stadler, and T. H. Kolbe. Conceptual requirements for the automatic reconstruction of building information models from uninterpreted 3d models. In *Academic Track of Geoweb 2009 Conference, Vancouver*, pages 46 – 53, 2009.
- [107] Martin E Newell, Richard G Newell, and Tom L Sancha. A new approach to the shaded picture problem. In *Proceedings of the ACM National Conference*, volume 443, page 50, 1972.
- [108] Christophe Nicolle, Mignard Clement, and Gesquiere Gilles. Interoperability between gis and bim-a semantic-based multi-representation approach. In *International conference on knowledge Management and information Sharing*, page 4, 2011.
- [109] Faidon Nikiforiadis and Adrian Pitts. 3d digital geometric reconstruction of the urban environment for daylight simulations studies. In *INTERNATIONAL BUILDING SIMULATION CONFERENCE*, volume 8, 2003.
- [110] Romain Nouvel, Claudia Schulte, Ursula Eicker, Dirk Pietruschka, and Volker Coors. Citygml-based 3d city model for energy diagnostics and urban energy policy support. *IBPSA World*, 2013 :1–7, 2013.
- [111] Andreas Nüchter, Hartmut Surmann, Kai Lingemann, and Joachim Hertzberg. Semantic scene analysis of scanned 3d indoor environments. In *VMV*, pages 215–221, 2003.
- [112] A.P. Nyaruhuma and G. Gerke, M. Vosselman. Verification of 2d building outlines using oblique airborne images. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 71 :62, 2012.
- [113] Sebastian Ochmann, Richard Vock, Raoul Wessel, Martin Tamke, and Reinhard Klein. Automatic generation of structural building descriptions from 3d point cloud scans. In *GRAPP 2014 - International Conference on Computer Graphics Theory and Applications*. SCITEPRESS, jan 2014.
- [114] Open Geospatial Consortium. City Geography Markup Language (CityGML) Encoding Standard, version 2.0.0, 2012. <http://www.opengeospatial.org/standards/citygml>.
- [115] Open Geospatial Consortium. City Geography Markup Language (CityGML) Encoding Standard, juillet 2015. URL <http://www.opengeospatial.org/standards/citygml>.

- [116] Norbert Paul and André Borrmann. Geometrical and topological approaches in building information modelling. *Journal of Information Technology in Construction* Vol, 14 :705–723, 2009.
- [117] Norbert Paul and Patrick Erik Bradley. *Topological houses*. Universität Karlsruhe, Institut für Wissenschaftliches Rechnen und Mathematische Modellbildung, 2003.
- [118] M Previtali, L Barazzetti, R Brumana, and M Scaioni. Towards automatic indoor reconstruction of cluttered building rooms from point clouds. *ISPRS Annals of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 1 :281–288, 2014.
- [119] G Priestnall, J Jaafar, and A Duncan. Extracting urban features from lidar digital surface models. *Computers, Environment and Urban Systems*, 24(2) : 65–78, 2000.
- [120] Shi Pu and George Vosselman. Extracting windows from terrestrial laser scanning. *Intl Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 36 :12–14, 2007.
- [121] Shi Pu and George Vosselman. Knowledge based reconstruction of building models from terrestrial laser scanning data. *{ISPRS} Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 64(6) :575 – 584, 2009.
- [122] Shi Pu, George Vosselman, et al. Automatic extraction of building features from terrestrial laser scanning. *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 36(5) :25–27, 2006.
- [123] José Ribelles, Paul S Heckbert, Michael Garland, Tom Stahovich, and Vinit Srivastava. Finding and removing features from polyhedra. In *Proceedings of DETC*, volume 1, pages 1–10, 2001.
- [124] Nora Ripperda and Claus Brenner. Data driven rule proposal for grammar based facade reconstruction. *Photogrammetric Image Analysis*, 36(3/W49A) : 1–6, 2007.
- [125] Nora Ripperda and Claus Brenner. Application of a formal grammar to facade reconstruction in semiautomatic and automatic environments. In *Proc. of the 12th AGILE Conference on GIScience*, pages 1–12, 2009.
- [126] D Robinson and A Stone. A simplified radiosity algorithm for general urban radiation exchange. *Building services engineering research and technology*, 26(4) :271–284, 2005.
- [127] Richard Romberg, Andreas Niggel, and Christoph Van Treeck. Structural analysis based on the product model standard ifc. 2004.

- [128] Douglas T Ross and Jorge E Rodriguez. Theoretical foundations for the computer-aided design system. In *Proceedings of the May 21-23, 1963, spring joint computer conference*, pages 305–322. ACM, 1963.
- [129] Franz Rottensteiner and Christian Brieze. A new method for building extraction in urban areas from high-resolution lidar data. *International Archives of Photogrammetry Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 34(3/A) :295–301, 2002.
- [130] D. Salesin, J Stolfi, and L. Guibas. Epsilon geometry : Building robust algorithms from imprecise computations. In *Proc. of the Fifth Annual Symposium on Computational Geometry*, SCG '89, pages 208–217. ACM, 1989.
- [131] Monika Sester. 3D visualization and generalization. In *Photogrammetric Week*, volume 7, pages 03–09, 2007.
- [132] Davood Shojaei, Mohsen Kalantari, Ian D Bishop, Abbas Rajabifard, and Ali Aien. Visualization requirements for 3d cadastral systems. *Computers, Environment and Urban Systems*, 41 :39–54, 2013.
- [133] Sinha S.N. Interactive 3d architectural modeling from unordered photo collections. *ACM SIGGRAPH Asia*, No. 159, page 1, 2008.
- [134] Gunho Sohn, Xianfeng Huang, and Vincent Tao. Using a binary space partitioning tree for reconstructing polyhedral building models from airborne lidar data. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 74(11) : 1425–1438, 2008.
- [135] B. P. Spring. Will computers design our buildings? *Architectural Forum*, 117 :122–125, October 1962.
- [136] I. Stamos, Gene Yu, G. Wolberg, and S. Zokai. 3d modeling using planar segments and mesh elements. In *3D Data Processing, Visualization, and Transmission, Third International Symposium on*, pages 599–606, June 2006.
- [137] Jantien Stoter and Martin Salzmann. Towards a 3d cadastre : where do cadastral needs and technical possibilities meet? *Computers, environment and urban systems*, 27(4) :395–410, 2003.
- [138] Daniel Sunday. Fast polygon area and newell normal computation. *Journal of Graphics Tools*, 7(2) :9–13, 2002. doi : 10.1080/10867651.2002.10487556.
- [139] Ivan E Sutherland, Robert F Sproull, and Robert A Schumacker. A characterization of ten hidden-surface algorithms. *ACM Computing Surveys (CSUR)*, 6(1) :1–55, 1974.

- [140] Filippo Tampieri. Graphics gems iii. chapter Newell's Method for Computing the Plane Equation of a Polygon, pages 231–232. Academic Press Professional, Inc., San Diego, CA, USA, 1992.
- [141] Pingbo Tang, Daniel Huber, Burcu Akinci, Robert Lipman, and Alan Lytle. Automatic reconstruction of as-built building information models from laser-scanned point clouds : A review of related techniques. *Automation in Construction*, 19(7) :829 – 843, 2010.
- [142] Frank Thiemann. Generalization of 3D Building Data. In *Part 4, GeoSpatial Theory, Processing and Applications*, pages 286–290, 2002.
- [143] Frank Thiemann and Monika Sester. Interpretation of building parts from boundary representation. In *Workshop on Next Generation 3D City Models (Foliensatz), Bonn*, 2005.
- [144] A. Thomsen, M. Breunig, E. Butwilowski, and B. Broscheit. Modelling and managing topology in 3d geoinformation systems. In *Advances in 3D Geoinformation Systems*, pages 229–246. Springer, 2008.
- [145] Sebastian Thrun, Christian Martin, Yufeng Liu, Dirk Hähnel, Rosemary Emery-Montemerlo, Deepayan Chakrabarti, and Wolfram Burgard. A real-time expectation-maximization algorithm for acquiring multiplanar maps of indoor environments with mobile robots. *Robotics and Automation, IEEE Transactions on*, 20(3) :433–443, 2004.
- [146] Trimble. SketchUp, Dernière visite en septembre 2015. URL <https://3dwarehouse.sketchup.com>.
- [147] Trimble. SketchUp, Dernière visite en avril 2015. URL <http://www.sketchup.com/>.
- [148] C. Van Treeck and E. Rank. Analysis of building structure and topology based on graph theory. In *Proceeding of the 10th International Conference on Computing in Civil and Building Engineering. Weimar*, 2004.
- [149] Christoph Van Treeck, Richard Romberg, and Ernst Rank. Simulation based on the product model standard ifc. In *Proc. 8th Int. IBPSA Conf. Building Simulation, Eindhoven, Netherlands*, volume 142, pages 1293–1300, 2003.
- [150] Rebekka Volk, Julian Stengel, and Frank Schultmann. Building information modeling (bim) for existing buildings — literature review and future needs. *Automation in Construction*, 38(0) :109 – 127, 2014.
- [151] George Vosselman, Sander Dijkman, et al. 3d building model reconstruction from point clouds and ground plans. *International Archives of Photogrammetry Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 34(3/W4) :37–44, 2001.

- [152] George Vosselman, Ben GH Gorte, George Sithole, and Tahir Rabbani. Recognising structure in laser scanner point clouds. *International archives of photogrammetry, remote sensing and spatial information sciences*, 46(8) :33–38, 2004.
- [153] Guowei Wan and Andrei Sharf. Grammar-based 3d facade segmentation and reconstruction. *Computers & Graphics*, 36(4) :216–223, 2012.
- [154] Ruisheng Wang. 3d building modeling using images and lidar : a review. *International Journal of Image and Data Fusion*, 4(4) :273–292, 2013.
- [155] Xiaoguang Wang, Stefano Totaro, Franck Taillandier, Allen R Hanson, and Seth Teller. Recovering facade texture and microstructure from real-world images. *INTERNATIONAL ARCHIVES OF PHOTOGRAMMETRY REMOTE SENSING AND SPATIAL INFORMATION SCIENCES*, 34(3/A) : 381–386, 2002.
- [156] K. Weiler. The radial edge structure : A topological representation for non-manifold geometric boundary modeling. In *IFIP WG 5.2 Working Conference, Rensselaerville, USA*, 1986.
- [157] Raoul Wessel, Ina Blümel, and Reinhard Klein. The room connectivity graph : Shape retrieval in the architectural domain. In *In proceedings of The 16-th International Conference in Central Europe on Computer Graphics, Visualization and Computer Vision'2008*, pages 73–80. Agency-Science Press, 2008.
- [158] Wikipedia. Building Smart, Dernière visite en septembre 2015. URL <https://en.wikipedia.org/wiki/BuildingSMART>.
- [159] Wikipedia. Objet 3D (format de fichier), Dernière visite en septembre 2015. URL https://fr.wikipedia.org/wiki/Objet_3D_%28format_de_fichier%29.
- [160] Wikipedia. Virtual Reality Markup Language, Dernière visite en juillet 2015. URL https://fr.wikipedia.org/wiki/Virtual_Reality_Markup_Language.
- [161] Wikipedia. Collaborative Design Activity, Dernière visite en avril 2015. URL http://fr.wikipedia.org/wiki/Collaborative_Design_Activity.
- [162] Wikipedia. Polygone simple, Dernière visite en juin 2015. URL https://fr.wikipedia.org/wiki/Polygone_simple.
- [163] Sven Woop, Louis Feng, Ingo Wald, and Carsten Benthin. Embree ray tracing kernels for cpus and the xeon phi architecture. In *ACM SIGGRAPH 2013 Talks, SIGGRAPH '13*, pages 44 :1–44 :1, New York, NY, USA, 2013. ACM.

- [164] Xuehan Xiong, Antonio Adan, Burcu Akinci, and Daniel Huber. Automatic creation of semantically rich 3d building models from laser scanner data. *Automation in Construction*, 31(0) :325–337, 2013.
- [165] Jiann yeou Rau and Liang chien Chen. Robust reconstruction of building models from three-dimensional line segments. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 69 :181–188, 2003.
- [166] Xuetao Yin, P. Wonka, and A. Razdan. Generating 3d building models from architectural drawings : A survey. *Computer Graphics and Applications, IEEE*, 29(1) :20–30, Jan 2009.
- [167] Shen Ying, Lin Li, and Renzhong Guo. Building 3d cadastral system based on 2d survey plans with sketchup. *Geo-spatial Information Science*, 14(2) : 129–136, 2011.
- [168] Cha Zhang and Tsuhan Chen. Efficient feature extraction for 2d/3d objects in mesh representation. In *Image Processing, 2001. Proceedings. 2001 International Conference on*, volume 3, pages 935–938. IEEE, 2001.
- [169] Keqi Zhang, Jianhua Yan, and Shu-Ching Chen. Automatic construction of building footprints from airborne lidar data. *Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transactions on*, 44(9) :2523–2533, 2006.
- [170] Wuming Zhang, Hongtao Wang, Yiming Chen, Kai Yan, and Mei Chen. 3d building roof modeling by optimizing primitive’s parameters using constraints from lidar data and aerial imagery. *Remote Sensing*, 6(9) :8107–8133, 2014.
- [171] Junqiao Zhao, Hugo Ledoux, and Jantien Stoter. Automatic repair of CityGML LOD2 buildings using shrink-wrapping. In Umit Isikdag, editor, *ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. Proceedings of the ISPRS 8th 3DGeoInfo Conference & WG II/2 Workshop*, pages 309–317, Istanbul, Turkey, 2013.
- [172] Junqiao Zhao, Jantien Stoter, and Hugo Ledoux. A framework for the automatic geometric repair of CityGML models. In Manfred Buchroithner, Nikolas Prechtel, and Dirk Burghardt, editors, *Cartography from Pole to Pole, Lecture Notes in Geoinformation and Cartography*, pages 187–202. Springer Berlin Heidelberg, 2014.
- [173] Siyka Zlatanova, Alias Abdul Rahman, and Wenzhong Shi. Topological models and frameworks for 3d spatial objects. *Computers & Geosciences*, 30 (4) :419–428, 2004.
- [174] Emanoil Zuckerberger, Ayellet Tal, and Shymon Shlafman. Polyhedral surface decomposition with applications. *Computers & Graphics*, 26(5) :733–743, 2002.